

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: J84E21002910001

## S.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

## ELETTRIFICAZIONE LINEA COMO – LECCO

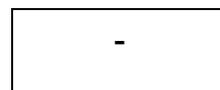
## TRATTA ALBATE CAMERLATA – LECCO

## INTERVENTI SU INFRASTRUTTURE INTERFERENTI

## ELABORATI GENERALI

### Relazione Geotecnica

SCALA:



COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

LC00 01 R 26 GE OC0000 001 A

| Rev. | Descrizione         | Redatto     | Data        | Verificato | Data        | Approvato      | Data        | Autorizzato Data         |
|------|---------------------|-------------|-------------|------------|-------------|----------------|-------------|--------------------------|
| A    | Emissione esecutiva | G. Grimaldi | Giugno 2023 | P. Pistone | Giugno 2023 | M. Berlingieri | Giugno 2023 | A. Perego<br>Giugno 2023 |
|      |                     |             |             |            |             |                |             |                          |
|      |                     |             |             |            |             |                |             |                          |
|      |                     |             |             |            |             |                |             |                          |
|      |                     |             |             |            |             |                |             |                          |





## INDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>PREMESSA.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>                                       | <b>10</b> |
| <b>3</b> | <b>DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....</b>                                       | <b>12</b> |
| 3.1      | DOCUMENTI .....   | 12        |
| 3.2      | ELABORATI GRAFICI .....   | 12        |
| <b>4</b> | <b>SINTESI DELL'INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLIGICO E IDROGEOLOGICO</b> | <b>14</b> |
| <b>5</b> | <b>INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE.....</b>                              | <b>16</b> |
| 5.1      | INDAGINI GEOGNOSTICHE.....  | 16        |
| 5.1.1    | Sondaggi .....  | 17        |
| 5.1.2    | Standard Penetration Test (SPT) .....                                       | 18        |
| 5.1.3    | Prove dilatometriche.....   | 22        |
| 5.1.4    | Prove di Permeabilità in foro .....   | 23        |
| 5.1.5    | Piezometria.....  | 24        |
| 5.1.6    | Prelievo dei campioni indisturbati e rimaneggiati .....                     | 24        |
| 5.2      | INDAGINI GEOFISICHE .....   | 27        |
| 5.3      | PROVE DI LABORATORIO .....  | 28        |
| <b>6</b> | <b>CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....</b>                     | <b>31</b> |
| 6.1      | TERRENI A GRANA GROSSA (SABBIE E GHIAIE) .....                              | 31        |
| 6.1.1    | Classificazione .....   | 31        |
| 6.1.2    | Stato di addensamento (Dr) .....  | 31        |
| 6.1.3    | Caratteristiche di resistenza ( $\varphi'$ ) .....                          | 32        |
| 6.1.4    | Caratteristiche di deformabilità.....                                       | 32        |
| 6.1.5    | Caratteristiche di permeabilità .....                                       | 33        |
| 6.2      | DEPOSITI COESIVI (LIMI E ARGILLE) .....                                     | 35        |
| 6.2.1    | Classificazione .....   | 35        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 6.2.2      | Caratteristiche di resistenza ( $c_u$ ).....                      | 35        |
| 6.2.3      | Caratteristiche di deformabilità.....                             | 35        |
| 6.2.4      | Caratteristiche di permeabilità .....                             | 36        |
| <b>6.3</b> | <b>AMMASSI ROCCIOSI.....</b>                                      | <b>38</b> |
| 6.3.1      | Classificazione .....   | 38        |
| 6.3.2      | Caratteristiche di resistenza .....                               | 38        |
| 6.3.3      | Caratteristiche di deformabilità.....                             | 39        |
| 6.3.1      | Caratteristiche di permeabilità .....                             | 40        |
| <b>7</b>   | <b>AZIONE SIMICA DI PROGETTO.....</b>                             | <b>41</b> |
| 7.1        | GENERALITÀ .....  | 41        |
| 7.2        | VITA NOMINALE .....   | 41        |
| 7.3        | CLASSE D'USO.....   | 42        |
| 7.4        | PERIODO DI RIFERIMENTO .....                                      | 43        |
| 7.5        | VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI PERICOLOSITÀ SISMICA.....            | 43        |
| 7.5.1      | Caratteristiche sismiche del sito.....                            | 44        |
| 7.6        | AMPLIFICAZIONE DI SITO .....                                      | 46        |
| 7.6.1      | Condizioni Topografiche .....                                     | 46        |
| 7.6.2      | Categorie di Sottosuolo.....                                      | 47        |
| 7.7        | RISPOSTA SISMICA LOCALE.....                                      | 52        |
| <b>8</b>   | <b>CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....</b>                         | <b>53</b> |
| 8.1        | DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE NON LAPIDEE INDIVIDUATE ..... | 53        |
| 8.1.1      | Unità R – Riporto .....   | 53        |
| 8.1.1.1    | Identificazione.....  | 53        |
| 8.1.1.2    | Parametri di resistenza .....                                     | 54        |
| 8.1.1.3    | Parametri di deformabilità.....                                   | 54        |
| 8.1.1.4    | Permeabilità .....  | 55        |
| 8.1.1.5    | Unità R – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....          | 55        |
| 8.1.2      | Unità P.....  | 56        |
| 8.1.2.1    | Identificazione.....  | 56        |

|   |    |
|---|----|
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 58 |
| 8.1.2.2 Parametri di deformabilità.....                           | 61 |
| 8.1.2.3 Permeabilità .....  | 61 |
| 8.1.2.4 Unità P – Sintesi parametri geotecnici di progetto.....   | 61 |
| 8.1.3 Unità Sp .....  | 62 |
| 8.1.3.1 Identificazione.....                                      | 62 |
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 65 |
| 8.1.3.2 Permeabilità .....  | 65 |
| 8.1.3.3 Unità Sp – Sintesi parametri geotecnici di progetto.....  | 66 |
| 8.1.4 Unità B.....  | 67 |
| 8.1.4.1 Identificazione.....                                      | 67 |
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 70 |
| 8.1.4.2 Parametri di deformabilità.....                           | 71 |
| 8.1.4.3 Unità B – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....  | 71 |
| 8.1.5 Unità CF.....   | 72 |
| 8.1.5.1 Identificazione.....                                      | 72 |
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 75 |
| 8.1.5.2 Parametri di deformabilità.....                           | 76 |
| 8.1.5.3 Permeabilità .....  | 77 |
| 8.1.5.4 Unità CF – Sintesi parametri geotecnici di progetto ..... | 78 |
| 8.1.6 Unità SG .....  | 79 |
| 8.1.6.1 Identificazione.....                                      | 79 |
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 82 |
| 8.1.6.2 Parametri di deformabilità.....                           | 84 |
| 8.1.6.3 Permeabilità .....  | 85 |
| 8.1.6.4 Unità SG – Sintesi parametri geotecnici di progetto.....  | 86 |
| 8.1.7 Unità SL.....   | 87 |
| 8.1.7.1 Identificazione.....                                      | 87 |
| 9.1.2.2 Parametri di resistenza .....                             | 90 |
| 8.1.7.2 Parametri di deformabilità.....                           | 92 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 8.1.7.3 | Permeabilità .....  | 93  |
| 8.1.7.4 | Unità SL – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....     | 94  |
| 8.1.8   | Unità L.....  | 95  |
| 8.1.8.1 | Identificazione.....  | 95  |
| 9.1.2.2 | Parametri di resistenza .....                                 | 98  |
| 8.1.8.2 | Parametri di deformabilità.....                               | 100 |
| 8.1.8.3 | Permeabilità .....  | 100 |
| 8.1.8.4 | Unità L – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....      | 101 |
| 8.2     | DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE LAPIDEE INDIVIDUATE ..... | 102 |
| 8.2.1   | Unità AM .....  | 102 |
| 8.2.1.1 | Identificazione.....  | 102 |
| 9.1.2.2 | Parametri di resistenza .....                                 | 103 |
| 8.2.1.2 | Parametri di deformabilità.....                               | 104 |
| 8.2.1.3 | Permeabilità .....  | 107 |
| 8.2.1.4 | Unità AM – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....     | 107 |
| 8.2.2   | Unità FBG .....   | 108 |
| 8.2.2.1 | Identificazione.....  | 108 |
| 9.1.2.2 | Parametri di resistenza .....                                 | 109 |
| 8.2.2.2 | Parametri di deformabilità.....                               | 110 |
| 8.2.2.3 | Permeabilità .....  | 113 |
| 8.2.2.4 | Unità FBG – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....    | 113 |
| 8.2.3   | Unità SAR .....   | 114 |
| 8.2.3.1 | Identificazione.....  | 114 |
| 9.1.2.2 | Parametri di resistenza .....                                 | 115 |
| 8.2.3.2 | Parametri di deformabilità.....                               | 117 |
| 8.2.3.3 | Unità SAR – Sintesi parametri geotecnici di progetto .....    | 119 |
| 8.2.4   | Unità C.....  | 120 |
| 8.2.4.1 | Identificazione.....  | 120 |
| 8.2.4.2 | Parametri di deformabilità.....                               | 120 |
| 8.2.4.3 | Permeabilità .....  | 121 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 8.3      | DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI .....                                 | 122        |
| 8.4      | STRATIGRAFIA .....  | 123        |
| 8.4.1    | TR05 - Cavalcavia Mazzini - Km 15+431 .....                                   | 123        |
| 8.4.2    | TR06 - Cavalcavia Brianne - Km 16+271 .....                                   | 124        |
| 8.4.3    | TR07 - Passerella - Km 17+584.....  | 125        |
| 8.4.4    | TR08 - Passerella Via Crispi - Km 18+612.....                                 | 126        |
| 8.4.5    | TR09 - Cavalcavia Cava Marma - Km 20+686 .....                                | 127        |
| 8.4.6    | TR10 - Cavalcavia "Punt de Ceser" - Km 25+688 .....                           | 128        |
| 8.4.7    | TR11 - Galleria Colle del Terrò - Km 26+480 - Km 27+029 .....                 | 129        |
| 8.4.8    | TR12 - Galleria Colle Montressone - Km 29+810 - Km 30+243.....                | 130        |
| 8.4.9    | TR13 - Galleria Montecastello e S.P. 36 - Km 31+489 - Km 32+193 .....         | 131        |
| 8.4.10   | TR14 - Cavalcavia Via alla Guzza - Km 36+002.....                             | 132        |
| <b>9</b> | <b>ANALISI DI PERICOLOSITA' RISPETTO AL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE .....</b> | <b>133</b> |

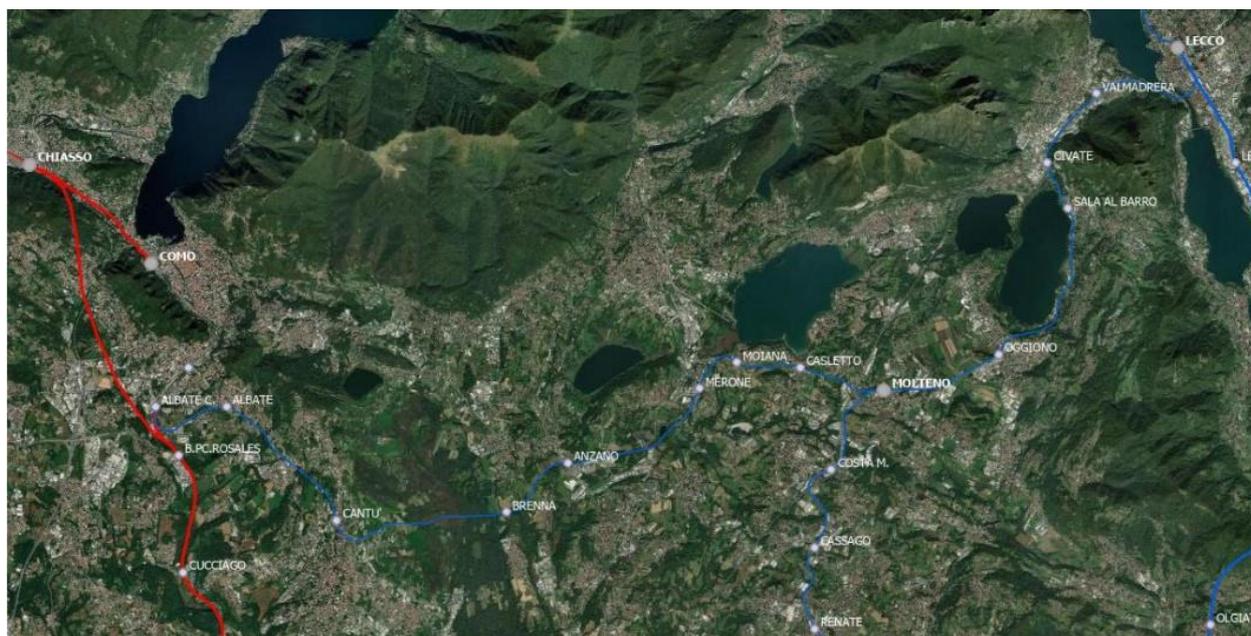
## 1 PREMESSA

Il progetto dell'elettrificazione della Linea Albate – Molteno – Lecco si configura come un progetto di investimenti di RFI per migliorare le prestazioni della linea esistente in termini di miglioramento della regolarità della circolazione ferroviaria e di potenziamento tecnologico, che consentirà la circolazione dei treni con locomotori elettrici alimentati a 3kV cc, nonché in termini di sostenibilità ambientale per l'eliminazione appunto della circolazione di locomotori diesel attualmente in servizio sulla linea.

La linea esistente è a binario unico, senza elettrificazione, ed è percorsa da Treni Regionali Trenord sulle relazioni Como-Molteno e Como-Lecco, dai Treni suburbani S7 tra Molteno e Lecco.

L'esercizio della linea è con Dirigente Locale e la circolazione regolata con Blocco Conta Assi.

Il tratto tra Como San Giovanni e Albate Camerlata (5 km) risulta già elettrificato a 3 kV c.c. ed è a doppio binario, l'intervento di elettrificazione riguarda, dunque, il tratto tra Albate C. e Lecco, di estesa pari a 37 km a semplice binario.

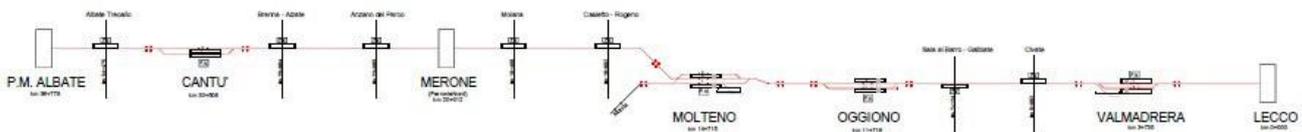


*Inquadramento territoriale*

L'intervento è inserito nell'elenco degli interventi di cui all'Appendice 9 "Elenco opere inserite nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza - PNRR" del Contratto di Programma 2017 – 2021 parte Investimenti Aggiornamento 2020/2021. Lo sviluppo del progetto è orientato ad implementare ogni soluzione tecnica e ottimizzazione del Programma Lavori per tragguardare l'attivazione al 2026.

Il Piano di Committenza prevede che il progetto sia caratterizzato da una prima fase comprendente l'elettrificazione della linea da Albate Camerlata a Molteno – Lotto 1. Questa Fase 1 di progetto tragarnerà l'attivazione al 2026 (PNNR) e sarà lo stato inerziale per il progetto della Fase 2, che vedrà l'elettrificazione della tratta da Molteno a Lecco – Lotto 2.

Di seguito si riporta lo schema funzionale della linea con indicate le località di servizio: Cantù, Merone, Molteno, Oggiono, Valmadrera e Lecco.



La sagoma di riferimento per l'elettrificazione è PMO2, con inserimento dell'attrezzaggio della TE sia con la catenaria flessibile che con la catenaria rigida. Con il PMO2 l'altezza minima del Piano di Contatto sarà di 4.80m.

Oggetto del presente intervento è il **Lotto 1**, l'elettrificazione della **tratta Albate Camerlata – Molteno**.

In particolare, nella presente relazione sono affrontati i seguenti aspetti:

- breve inquadramento geologico, morfologico e idrogeologico;
- descrizione delle indagini geotecniche eseguite in sito ed in laboratorio;
- rilievo del livello di falda;
- descrizione dei criteri in base ai quali sono stati interpretati i risultati delle indagini geotecniche effettuate;
- interpretazione dei risultati delle indagini geotecniche e definizione dei parametri geotecnici, in termini di proprietà fisiche e meccaniche (resistenza al taglio e deformabilità), per le unità geotecniche intercettate lungo la viabilità;
- caratterizzazione geotecnica in corrispondenza delle opere d'arte principali: stratigrafia, definizione dei parametri geotecnici di progetto, individuazione livello di falda, categoria sismica di sottosuolo.

## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- UNI EN 1997-1 - Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali.
- UNI EN 1997-2 - Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo.
- O.P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003 e s.m.i., “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica” e successive modifiche ed integrazioni.
- O.P.C.M. n. 3519 del 28/04/2006, "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone".
- D.M. 17/01/2018, “Norme tecniche per le costruzioni”.
- D.M. 06/05/2008, integrazione al D.M. 14/01/2008.
- D.M. 11.03.1988: “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle opere di fondazione”. (DPR. 5 ottobre 2010, n. 207 artt. 52-53).
- Circ. Min. II.TT. 02/02/2009, n. 617, “Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto ministeriale 14/01/2008”.
- Circ. Min. II.TT. 05/08/2009, “Nuove norme tecniche per le costruzioni approvate con decreto del Ministro delle infrastrutture 14 gennaio 2008 - Cessazione del regime transitorio di cui all'articolo 20, comma 1, del decreto-legge 31 dicembre 2007, n. 248”.
- Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni», G.U. n.42 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.8.
- RFI DTC SI AG MA IFS 002 A del Dic. 2018: Manuale di progettazione delle Opere Civili – Parte II – Sezione 7 – Geologia.
- Tariffa IG di RFI in vigore nel 2018.
- Regione Lombardia, Deliberazione di Giunta regionale 30 novembre 2011–n. IX/2616 - Aggiornamento dei ‘Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio, in attuazione dell’art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12’, approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con d.g.r. 28 maggio 2008, n. 8/7374”
- Regione Lombardia, Deliberazione di Giunta Regionale 7 novembre 2003 - n. 7/14964, Disposizioni preliminari per l’attuazione dell’Ordinanza Presidenza del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica».
- Regione Lombardia, Deliberazione di Giunta Regionale 30 marzo 2016 - n. X/5001, Approvazione delle linee di indirizzo e coordinamento per l’esercizio delle funzioni trasferite ai comuni in materia sismica (artt. 3, comma 1, e 13, comma 1, della l.r. 33/2015).
- Regione Lombardia, Deliberazione di Giunta regionale 30 novembre 2011–n. IX/2616 - Aggiornamento dei ‘Criteri ed indirizzi per la definizione della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di



**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA ALBATE-MOLTENO-LECCO**

RELAZIONE GEOTECNICA

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO    |
|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| LC00     | 01    | R 26 GE  | OC0000 001 | A    | 11 di 133 |

governo del territorio, in attuazione dell'art. 57, comma 1, della l.r. 11 marzo 2005, n. 12', approvati con d.g.r. 22 dicembre 2005, n. 8/1566 e successivamente modificati con d.g.r. 28 maggio 2008, n. 8/7374"

- Regione Lombardia, Deliberazione di Giunta Regionale 19 giugno 2017-n. X/6738 - Disposizioni concernenti l'attuazione del Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza.
- RFI DTC SI SP IFS 001 B del 22-12-2018 "Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Sez. 3 – Rilievi geologici e indagini geognostiche".

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 DOCUMENTI

| Identificativo   | Scala | Codifiche Italferr |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|-------|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |       | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | I | G | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | A |
| Indagini geofisiche  | -     | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | I | G | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | A |
| Geofisica integrativa  | -     | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | I | G | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | A |
| Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica | -     | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | R | G | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | A |

#### 3.2 ELABORATI GRAFICI

| Identificativo                                 | Scala      | Codifiche Italferr |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|------------|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |            | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 1/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 2/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 3/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 3 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 4/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 5/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 6/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 6 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 7/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 7 | A |

| Identificativo                                 | Scala      | Codifiche Italferr |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|--|------------|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  |            | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 8/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 | A |
| Carta e profilo geologico e geomorfologico 9/9 | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 9 | A |
| Profilo idrogeologico 1/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | A |
| Profilo idrogeologico 2/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | A |
| Profilo idrogeologico 3/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 | A |
| Profilo idrogeologico 4/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 4 | A |
| Profilo idrogeologico 5/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 5 | A |
| Profilo idrogeologico 6/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 6 | A |
| Profilo idrogeologico 7/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 7 | A |
| Profilo idrogeologico 8/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 8 | A |
| Profilo idrogeologico 9/9                      | 1:5000/500 | L                  | C | 0 | 0 | 0 | 0 | R | 6 | 9 | L | 5 | G | E | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 9 | A |

## **4 SINTESI DELL'INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO E IDROGEOLOGICO**

Si riporta di seguito una sintesi dello studio geologico:

- Dal punto di vista geografico l'area oggetto di studio è ubicata nella parte settentrionale della Regione Lombardia, comprendendo come estremi i comuni di Como e di Lecco.
- Dal punto di vista geologico il territorio dell'area oggetto di questo studio è suddivisibile in due settori distinti. La fascia pedecollinare e la pianura sono costituite da ampie falde di depositi neogenici-quadernari originati dallo smantellamento sin-orogenetico e post-orogenetico delle rocce del substrato roccioso. La zona dei colli appartiene alla porzione più meridionale delle Prealpi Lombarde ed è formata da rocce di età cretacea, fagliate e piegate. La maggior parte del tracciato ferroviario ricade per la quasi complessità del suo tracciato al di sopra dei depositi morenici caratteristici di quest'area e solamente nei chilometri finali interseca formazioni cretache affioranti. L'assetto strutturale dell'area di studio è il prodotto del raccorciamento avvenuto in questo settore delle Alpi Meridionali durante la fase compressiva neoalpina.
- Dal punto di vista stratigrafico, il substrato roccioso limita i suoi affioramenti alla parte settentrionale e centrale dell'area di studio e si individua una successione di unità litostratigrafiche cretaco-mioceniche. Nella parte nord-orientale (Brianza lecchese) la classica successione flyschoidale della Bergamasca comprende successioni ritmiche arenaceo-marnose (arenaria di Sarnico, Flysch di Bergamo) alle quali si intercalano corpi grossolani (conglomerato di Sirone) e depositi legati a franamenti sinsedimentari di estensione bacinale. L'affioramento del substrato è generalmente concentrato nel settore nord-occidentale, oppure non riconoscibile a causa dell'estesa copertura detritica principalmente depositatesi durante le glaciazioni plioquadernarie. La coltre detritica è costituita da materiale incoerente distinto sulla base dell'età relativa nonché dei meccanismi di deposizione ed è formata prevalentemente da terreni di origine fluvio-glaciale e glaciale-peliti.
- L'area in esame, dal punto di vista morfologico, è caratterizzata da un paesaggio collinare intervallato dalla presenza di laghetti. Dal punto di vista idrografico le aree di studio intersecano o vengono lambite da dei corsi d'acqua, maggiori e minori, appartenenti al bacino dell'Adda. Il reticolo idrografico naturale dell'area di studio è formato, data la sua vasta area, da numerosi torrenti che scendono dai rilievi collinari, oltre che da una rete di canali e rogge piuttosto fitta.
- Per quanto riguarda la permeabilità, il tracciato si imposta principalmente su terreni composti da depositi fluvio-glaciali e glaciali, con permeabilità variabile tra  $10^{-2}$  e  $10^{-9}$  m/s. Nelle zone di Como affiorano anche formazioni del substrato roccioso con una permeabilità inferiore a  $10^{-8}$  m/s. Invece nella zona di Lecco affiorano inoltre rocce calcaree con permeabilità variabile sia tra  $10^{-5}$  e  $10^{-9}$  m/s sia tra  $10^{-2}$  e  $10^{-5}$  m/s.
- Per quanto riguarda il rischio da alluvione, sulla base della cartografia redatta nell'ambito del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) sia quella redatta nell'ambito della Direttiva Alluvioni (PGRA, aggiornata 2020) dell'Autorità di Bacino del fiume Po. Le diverse aree di studio si trovano adiacenti e all'interno di aree a pericolosità moderata, media ed elevata e alla Fascia fluviale A del Fiume Lambro (considerando anche i suoi affluenti).
- In particolare, come si evince dalle Carte di Fattibilità Geologica dei PGT dei vari comuni attraversati, la linea ferroviaria interseca zone caratterizzate da classi di fattibilità 2 - Fattibilità con modeste limitazioni, 3



**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA ALBATE-MOLTENO-LECCO**

RELAZIONE GEOTECNICA

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO    |
|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| LC00     | 01    | R 26 GE  | OC0000 001 | A    | 15 di 133 |

- Fattibilità con consistenti limitazioni e 4 - Fattibilità con gravi limitazioni, di seguito descritte. Per quanto riguarda le normative d'uso si rimanda alle "Norme geologiche di Piano" di ciascun PGT comunale.

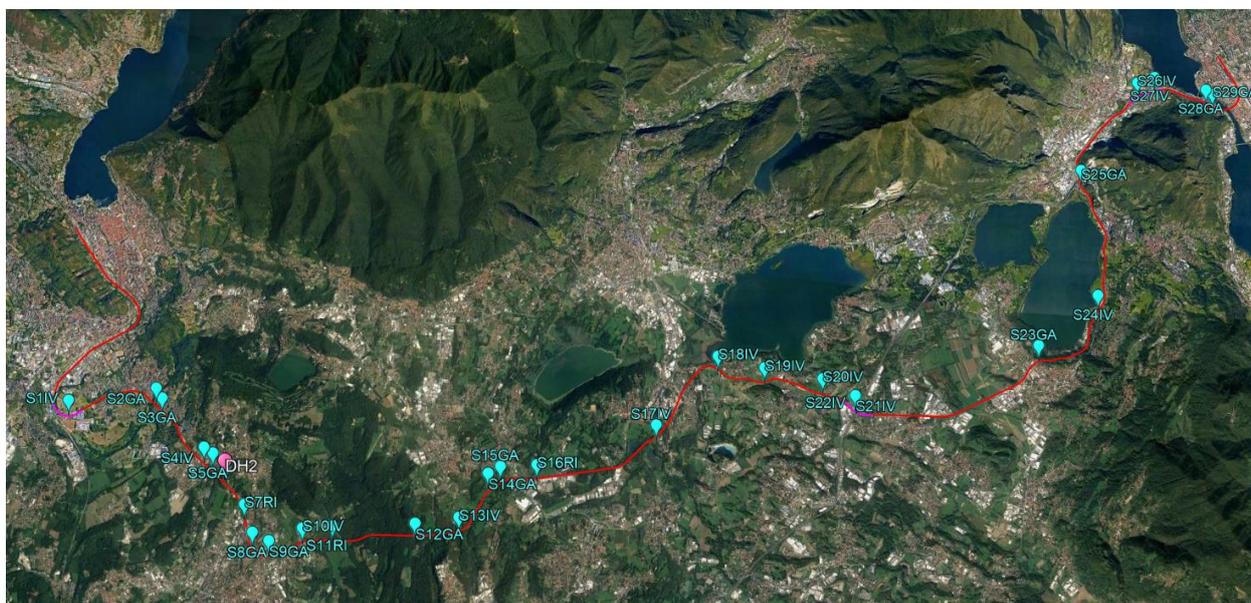
Per maggiori informazioni si rimanda alla relazione specifica (LC0000R69RGGE0001001A).

## 5 INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

### 5.1 INDAGINI GEOGNOSTICHE

A supporto della progettazione di fattibilità tecnico economica dell'Elettrificazione della tratta ferroviaria Albate-Molteno-Lecco, Italferr ha condotto, nell'anno 2022, le seguenti indagini nell'area in studio:

- n. 26 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino alla profondità max tra 25 e 44 m (differenza in base all'ubicazione del sondaggio);
- n. 213 prove in foro di tipo SPT;
- n. 6 prove dilatometriche;
- n. 36 prove di permeabilità di tipo Lefranc a carico variabile;
- n. 3 prove di permeabilità di tipo Lugeon;
- prelievo di n.81 campioni totali, indisturbati e rimaneggiati.



*Figura 1: Ubicazione indagini geognostiche.*

Inoltre, al fine di ricostruire il modello stratigrafico lungo la linea, sono stati utilizzati dati derivanti da fonti rese disponibili tramite il Geoportale della Regione Lombardia.

Le indagini utilizzate per il presente studio comprendono 13 sondaggi geognostici a profondità variabili tra i 10 m ed i 83 m.

### 5.1.1 Sondaggi

| Sondaggi Italferr 2022 |                             |                    |                     |                          |           |                        |
|------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|--------------------------|-----------|------------------------|
| ID                     | PROFONDITA'<br>(m dal p.c.) | DATA<br>ESECUZIONE | Quota<br>(m s.l.m.) | Coordinate UTM Zone 32 N |           | ATTREZZATURA           |
|                        |                             |                    |                     | E                        | N         |                        |
| S1 IV                  | 40                          | 24/02 - 03/03/22   | 283                 | 506053                   | 5068726   | Piezometro T.A. (3''') |
| S2 GA                  | 30                          | 06 - 07/06/22      | 337                 | 508126                   | 5069023   | Piezometro T.A. (3''') |
| S4 IV                  | 30                          | 10 - 12/03/22      | 341                 | 509102                   | 5067884   | Piezometro T.A. (3''') |
| S5 GA                  | 45                          | 30/03 - 06/04/22   | 364                 | 509296                   | 5067794   | Piezometro T.A. (3''') |
| S6 GA                  | 45                          | 29/03 - 06/04/22   | 386                 | 509563                   | 5067584   | Down-hole              |
| S7 RI                  | 27,5                        | 08 - 09/03/22      | 335                 | 510026                   | 5066778   |                        |
| S8 GA                  | 30                          | 07 - 09/04/22      | 362                 | 510279                   | 5066211   |                        |
| S10 IV                 | 30                          | 14 - 16/03/22      | 367                 | 511321                   | 5066371   | Piezometro T.A. (3''') |
| S11 RI                 | 30                          | 16 - 18/03/22      | 360                 | 511918                   | 5066446   |                        |
| S12 GA                 | 45                          | 15 - 21/06/22      | 370                 | 513 728                  | 5066589   | Piezometro T.A. (3''') |
| S13 IV                 | 40                          | 19 - 22/03/22      | 335                 | 514583                   | 5066900   | Piezometro T.A. (3''') |
| S14 GA                 | 30                          | 14 - 22/04/22      | 340                 | 515077                   | 5067712   |                        |
| S15 GA                 | 30                          | 11 - 12/04/22      | 332                 | 515307                   | 5067886   |                        |
| S16 IV                 | 25                          | 22 - 23/03/22      | 314                 | 516069                   | 5067967   | Piezometro T.A. (3''') |
| S17 IV                 | 30                          | 28 - 29/03/22      | 290                 | 518571                   | 5069094   | Piezometro T.A. (3''') |
| S19 IV                 | 40                          | 13 - 17/05/22      | 269                 | 521115                   | 5070314   |                        |
| S20 IV                 | 30                          | 25 - 26/03/22      | 272                 | 522009                   | 5070129   |                        |
| S21 IV                 | 40                          | 23 - 25/03/22      | 272                 | 522735                   | 5069858   | Piezometro T.A. (3''') |
| S22 IV                 | 40                          | 24 - 26/03/22      | 271                 | 522763                   | 5069784   | Down-hole              |
| S23 GA                 | 30                          | 21 - 23/06/22      | 268                 | 526 375                  | 5 070 929 | Piezometro T.A. (3''') |
| S24 IV                 | 40                          | 28/04 - 02/05/22   | 235                 | 527868                   | 5072251   | Piezometro T.A. (3''') |
| S25 GA                 | 27                          | 23 - 27/04/22      | 245                 | 527505                   | 5075085   | Piezometro T.A. (3''') |
| S26 IV                 | 40                          | 17 - 19/05/22      | 225                 | 528510                   | 5076909   | Piezometro T.A. (3''') |

| Sondaggi Italferr 2022 |    |               |     |        |         |                          |
|------------------------|----|---------------|-----|--------|---------|--------------------------|
| S27 IV                 | 40 | 06 - 10/05/22 | 232 | 529151 | 5077389 | Piezometro T.A. (3''''') |
| S29 GA                 | 30 | 11 - 12/05/22 | 211 | 530462 | 5076925 | Piezometro T.A. (3''''') |
| S32 CTE                | 30 | 19 - 20/05/22 | 209 | 530968 | 5077380 |                          |

*Figura 2: Sondaggi geognostici – Campagna Italferr 2022.*

| Sondaggio    | Profondità (m dal p.c.) | Quota (m s.l.m.) | Coordinate UTM Zone 32 N (WGS 84) |             |
|--------------|-------------------------|------------------|-----------------------------------|-------------|
|              |                         |                  | E                                 | N           |
| B5B180089532 | 38                      | 307,5            | 507984,5985                       | 5069517,636 |
| B5A175729221 | 10                      | 307,2            | 507546,3871                       | 5069201,393 |
| B5A176768841 | 74,5                    | 275              | 507650,9593                       | 5068822,157 |
| B5A177418779 | 67,5                    | 275              | 507716,2957                       | 5068759,982 |
| B5B188318061 | 30                      | 330              | 508804,507                        | 5068040,592 |
| B5B187147715 | 33                      | 303              | 508686,9722                       | 5067693,565 |
| B5B195797562 | 54                      | 425              | 509548,3763                       | 5067547,218 |
| B5B103467162 | 38,6                    | 376              | 510311,9142                       | 5067141,17  |
| B5B115595668 | 36                      | 360,2            | 511535,8447                       | 5065648,035 |
| B5B138156367 | 82                      | 365              | 513786,1469                       | 5066341,865 |
| B5B156917806 | 56                      | 350              | 515668,3299                       | 5067783,319 |
| B4D570251166 | 82,6                    | 270              | 526997,2651                       | 5071139,367 |
| B4D473775071 | 15                      | 225              | 527349,2749                       | 5075048,744 |

*Figura 3: Sondaggi geognostici – Database della Regione Lombardia.*

### 5.1.2 Standard Penetration Test (SPT)

Le indagini in sito sono state condotte attraverso prove penetrometriche dinamiche Standard Penetration Test (SPT). Queste prove sono infatti particolarmente significative per le formazioni incoerenti, dalle quali risulta sempre difficile prelevare campioni, e consentono di verificarne il grado di addensamento.

La prova SPT consiste nella misura del numero di colpi necessari per l'infissione di un campionatore Raymond sotto i colpi di un maglio della massa di 63.5 kg. La resistenza alla penetrazione è caratterizzata dalla somma del numero di colpi necessari all'avanzamento del secondo e terzo tratto, ognuno da 150 mm:

$$N_{SPT} = N_2 + N_3$$

In totale sono state eseguite 213 prove SPT i cui risultati sono riportati in tabella.

| id. | Sondaggio | SPT  | profondità media<br>(m da pc) | N1 | N2 | N3 | Nspt |
|-----|-----------|------|-------------------------------|----|----|----|------|
| 1   | S1 IV     | 1    | 3.2                           | 6  | 7  | 8  | 15   |
| 2   |           | 2    | 6.2                           | 7  | 8  | 10 | 18   |
| 3   |           | 3    | 9.1                           | 22 | R  |    | R    |
| 4   |           | 4    | 15.2                          | 9  | 10 | 12 | 22   |
| 5   |           | 5    | 18.2                          | 7  | 9  | 11 | 20   |
| 6   |           | 6    | 21.2                          | 18 | 21 | 30 | 51   |
| 7   |           | 7    | 24.2                          | 19 | 33 | 41 | 74   |
| 8   |           | 8    | 30.0                          | R  |    |    | R    |
| 9   |           | 9    | 36.1                          | 50 | R  |    | R    |
| 10  |           | 10   | 39.2                          | 19 | 27 | 36 | 63   |
| 11  | S2 GA     | 1    | 1.7                           | 3  | 4  | 4  | 8    |
| 12  |           | 2    | 4.6                           | 41 | R  |    | R    |
| 13  |           | 3    | 7.7                           | 12 | 15 | 19 | 34   |
| 14  |           | 4    | 10.7                          | 15 | 24 | 32 | 56   |
| 15  |           | 5    | 13.7                          | 20 | 24 | 28 | 52   |
| 16  |           | 6    | 16.5                          | R  |    |    | R    |
| 17  | S4 IV     | 1    | 3.2                           | 3  | 2  | 4  | 6    |
| 18  |           | 2    | 6.2                           | 3  | 5  | 9  | 14   |
| 19  |           | 3    | 9.2                           | 41 | R  |    | R    |
| 20  |           | 4    | 12.0                          | R  |    |    | R    |
| 21  |           | 15.0 | R                             |    |    | R  |      |
| 22  | S5 GA     | 1    | 1.7                           | 18 | 27 | 33 | 60   |
| 23  |           | 2    | 5.0                           | R  |    |    | R    |
| 24  |           | 3    | 9.0                           | R  |    |    | R    |
| 25  | S6 GA     | 1    | 1.7                           | 11 | 8  | 8  | 16   |
| 26  |           | 2    | 4.7                           | 3  | 8  | 9  | 17   |
| 27  |           | 3    | 7.7                           | 12 | 28 | 43 | 71   |
| 28  |           | 4    | 10.6                          | 37 | R  |    | R    |
| 29  | S7 RI     | 1    | 3.2                           | 4  | 3  | 6  | 9    |
| 30  |           | 2    | 6.2                           | 4  | 18 | R  | R    |
| 31  |           | 3    | 9.1                           | 4  | 6  | 11 | 17   |
| 32  |           | 4    | 12.2                          | 15 | 16 | 20 | 36   |
| 33  |           | 5    | 15.2                          | 16 | 18 | 32 | 50   |
| 34  |           | 6    | 18.2                          | 34 | R  |    | R    |
| 35  |           | 7    | 21.2                          | 27 | 39 | 44 | 83   |
| 36  |           | 8    | 24.2                          | 21 | 27 | 39 | 66   |
| 37  |           | 9    | 27.2                          | 13 | 21 | 33 | 54   |
| 38  | S8 GA     | 1    | 1.7                           | 12 | 18 | 29 | 47   |
| 39  |           | 2    | 4.7                           | 36 | 39 | R  | R    |
| 40  |           | 3    | 6.2                           | 20 | 30 | 35 | 65   |
| 41  |           | 4    | 9.1                           | R  |    |    | R    |
| 42  |           | 5    | 12.1                          | R  |    |    | R    |
| 43  |           | 6    | 15.2                          | 21 | 29 | 37 | 66   |
| 44  |           | 7    | 18.1                          | 38 | R  |    | R    |
| 45  |           | 8    | 21.2                          | 18 | 27 | 34 | 61   |
| 46  |           | 9    | 24.2                          | 15 | 25 | 31 | 56   |
| 47  |           | 10   | 27.1                          | R  |    |    | R    |

RELAZIONE GEOTECNICA

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
LC00 01 R 26 GE OC0000 001 A 20 di 133

|     |        |    |      |    |    |    |    |
|-----|--------|----|------|----|----|----|----|
| 48  | S9 GA  | 1  | 1.7  | 2  | 3  | 5  | 8  |
| 49  |        | 2  | 4.7  | 12 | 18 | 22 | 40 |
| 50  |        | 3  | 7.7  | 15 | 22 | 25 | 47 |
| 51  |        | 4  | 10.7 | 10 | 13 | 18 | 31 |
| 52  |        | 5  | 13.7 | 8  | 11 | 16 | 27 |
| 53  |        | 6  | 16.7 | 4  | 7  | 7  | 14 |
| 54  |        | 7  | 19.7 | 4  | 6  | 7  | 13 |
| 55  |        | 8  | 22.5 | R  |    |    | R  |
| 56  |        | 9  | 25.6 | R  |    |    | R  |
| 57  |        | 10 | 28.6 | 42 | R  |    | R  |
| 58  | S10 IV | 1  | 3.2  | 1  | 1  | 2  | 3  |
| 59  |        | 2  | 6.1  | 32 | R  |    | R  |
| 60  |        | 3  | 9.1  | R  |    |    | R  |
| 61  |        | 4  | 12.0 | R  |    |    | R  |
| 62  |        | 5  | 15.0 | R  |    |    | R  |
| 63  | S11 RI | 1  | 3.2  | 1  | 2  | 2  | 4  |
| 64  |        | 2  | 6.2  | 6  | 7  | 9  | 16 |
| 65  |        | 3  | 9.1  | 36 | R  |    | R  |
| 66  |        | 4  | 12.2 | 17 | 29 | 40 | 69 |
| 67  |        | 5  | 15.2 | 16 | 24 | 33 | 57 |
| 68  |        | 6  | 18.2 | 36 | 22 | 15 | 37 |
| 69  |        | 7  | 21.2 | 9  | 13 | 17 | 30 |
| 70  |        | 8  | 24.2 | 16 | 21 | 29 | 50 |
| 71  |        | 9  | 27.2 | 6  | 9  | 7  | 16 |
| 72  | S12 GA | 1  | 1.7  | 3  | 4  | 5  | 9  |
| 73  |        | 2  | 4.7  | 5  | 7  | 7  | 7  |
| 74  |        | 3  | 7.7  | 32 | 41 | R  | R  |
| 75  |        | 4  | 10.7 | 9  | 12 | 15 | 27 |
| 76  |        | 5  | 13.7 | 15 | 23 | 30 | 53 |
| 77  |        | 6  | 16.7 | 17 | 25 | 32 | 57 |
| 78  |        | 7  | 19.7 | 22 | 28 | 35 | 63 |
| 79  |        | 8  | 22.7 | 20 | 25 | 32 | 57 |
| 80  |        | 9  | 25.5 | R  |    |    | R  |
| 81  |        | 10 | 28.7 | 19 | 28 | 40 | 68 |
| 82  |        | 11 | 31.7 | 10 | 15 | 18 | 33 |
| 83  |        | 12 | 34.7 | 12 | 18 | 21 | 39 |
| 84  |        | 13 | 37.7 | 15 | 16 | 22 | 38 |
| 85  |        | 14 | 40.7 | 10 | 15 | 20 | 35 |
| 86  |        | 15 | 43.7 | 8  | 12 | 15 | 27 |
| 87  | S13 IV | 1  | 3.2  | 3  | 7  | 24 | 31 |
| 88  |        | 2  | 6.1  | 39 | R  |    | R  |
| 89  |        | 3  | 9.1  | 21 | R  |    | R  |
| 90  |        | 4  | 12.1 | R  |    |    | R  |
| 91  |        | 5  | 15.0 | R  |    |    | R  |
| 92  |        | 6  | 18.0 | R  |    |    | R  |
| 93  |        | 7  | 21.0 | R  |    |    | R  |
| 94  |        | 8  | 24.0 | R  |    |    | R  |
| 95  |        | 9  | 30.1 | R  |    |    | R  |
| 96  |        | 10 | 36.1 | R  |    |    | R  |
| 97  |        | 11 | 39.0 | R  |    |    | R  |
| 98  | S14 GA | 1  | 1.7  | 2  | 2  | 2  | 4  |
| 99  |        | 2  | 4.7  | 7  | 9  | 11 | 20 |
| 100 |        | 3  | 7.7  | 20 | 22 | 28 | 50 |
| 101 |        | 4  | 10.2 | 18 | 23 | 32 | 55 |
| 102 |        | 5  | 13.2 | 10 | 15 | 19 | 34 |
| 103 |        | 6  | 16.2 | 18 | 24 | 36 | 60 |
| 104 |        | 7  | 19.2 | 12 | 16 | 25 | 41 |
| 105 |        | 8  | 22.2 | 15 | 26 | 38 | 64 |
| 106 |        | 9  | 25.2 | 18 | 31 | 42 | 73 |
| 107 |        | 10 | 28.1 | 34 | R  |    | R  |
| 108 | S15 GA | 1  | 1.7  | 2  | 3  | 3  | 6  |
| 109 |        | 2  | 4.7  | 5  | 7  | 7  | 14 |
| 110 |        | 3  | 7.7  | 7  | 12 | 12 | 24 |
| 111 |        | 4  | 10.7 | 5  | 8  | 10 | 18 |
| 112 |        | 5  | 13.7 | 7  | 9  | 12 | 21 |
| 113 |        | 6  | 16.7 | 8  | 10 | 13 | 23 |
| 114 |        | 7  | 19.6 | 36 | R  |    | R  |
| 115 |        | 8  | 22.5 | R  |    |    | R  |
| 116 |        | 9  | 25.7 | 27 | 38 | R  | R  |
| 117 |        | 10 | 28.6 | 44 | R  |    | R  |
| 118 | S16 IV | 1  | 3.2  | 3  | 3  | 7  | 10 |
| 119 |        | 2  | 6.1  | 5  | 5  | 6  | 11 |
| 120 |        | 3  | 10.1 | 29 | R  |    | R  |
| 121 | S17 IV | 1  | 3.1  | R  |    | R  |    |
| 122 | S18 IV | 1  | 3.2  | 13 | 26 | 30 | 56 |
| 123 |        | 2  | 6.2  | 18 | 28 | 37 | 65 |
| 124 |        | 3  | 9.1  | R  |    |    | R  |

|     |         |    |      |    |    |    |    |
|-----|---------|----|------|----|----|----|----|
| 125 | S19 IV  | 1  | 3.2  | 1  | 1  | 1  | 2  |
| 126 |         | 2  | 6.7  | 1  | 1  | 1  | 2  |
| 127 |         | 3  | 9.2  | 1  | 2  | 1  | 3  |
| 128 |         | 4  | 12.2 | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 129 |         | 5  | 15.2 | 18 | 24 | 41 | 65 |
| 130 |         | 6  | 18.1 | 35 | R  |    | R  |
| 131 |         | 7  | 21.1 | R  |    |    | R  |
| 132 | S20 IV  | 1  | 3.2  | 5  | 10 | 12 | 22 |
| 133 |         | 2  | 6.2  | 6  | 18 | 24 | 42 |
| 134 |         | 3  | 9.2  | 7  | 19 | 23 | 42 |
| 135 |         | 4  | 10.1 | 44 | R  |    | R  |
| 136 |         | 5  | 15.2 | 18 | 29 | 34 | 63 |
| 137 | S21 IV  | 1  | 3.2  | 19 | 41 | R  | R  |
| 138 |         | 2  | 6.1  | 33 | R  |    | R  |
| 139 |         | 3  | 9.0  | R  |    |    | R  |
| 140 |         | 4  | 15.2 | 27 | 39 | R  | R  |
| 141 |         | 5  | 18.1 | 23 | R  |    | R  |
| 142 |         | 6  | 21.2 | 29 | 45 | R  | R  |
| 143 |         | 7  | 24.0 | R  |    |    | R  |
| 144 | S22 IV  | 1  | 3.2  | 9  | 1  | 1  | 2  |
| 145 |         | 2  | 6.1  | 29 | R  |    | R  |
| 146 |         | 3  | 9.2  | 3  | 5  | 5  | 10 |
| 147 |         | 4  | 15.2 | 10 | 12 | 12 | 24 |
| 148 |         | 5  | 18.2 | 17 | 30 | 41 | 71 |
| 149 |         | 6  | 21.2 | 21 | 21 | R  | R  |
| 150 |         | 7  | 24.2 | 24 | 24 | R  | R  |
| 151 | S23     | 1  | 3.0  | R  |    |    | R  |
| 152 |         | 2  | 6.2  | 7  | 9  | 15 | 24 |
| 153 |         | 3  | 9.2  | 6  | 8  | 13 | 21 |
| 154 |         | 4  | 12.2 | 4  | 6  | 10 | 16 |
| 155 |         | 5  | 15.2 | 4  | 5  | 7  | 12 |
| 156 |         | 6  | 18.2 | 4  | 5  | 7  | 12 |
| 157 |         | 7  | 21.2 | 10 | 13 | 18 | 31 |
| 158 |         | 8  | 24.0 | R  |    |    | R  |
| 159 |         | 9  | 27.0 | R  |    |    | R  |
| 160 |         | 10 | 29.7 | 8  | 12 | 15 | 27 |
| 161 | S24 IV  | 1  | 3.2  | 11 | 11 | 12 | 23 |
| 162 |         | 2  | 6.2  | 13 | 19 | 31 | 50 |
| 163 | S25 GA  | 1  | 1.7  | 5  | 12 | 15 | 27 |
| 164 |         | 2  | 4.7  | 29 | R  |    | R  |
| 165 |         | 3  | 7.2  | 1  | 2  | 0  | 2  |
| 166 |         | 4  | 10.2 | 3  | 5  | 8  | 13 |
| 167 | S26 IV  | 1  | 3.2  | 3  | 4  | 4  | 8  |
| 168 |         | 2  | 6.7  | 3  | 3  | 4  | 7  |
| 169 |         | 3  | 9.2  | 4  | 4  | 5  | 9  |
| 170 |         | 4  | 13.2 | 2  | 3  | 3  | 6  |
| 171 |         | 5  | 18.2 | 2  | 3  | 3  | 6  |
| 172 |         | 6  | 21.2 | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 173 |         | 7  | 24.2 | 3  | 3  | 5  | 8  |
| 174 |         | 8  | 30.2 | 3  | 4  | 5  | 9  |
| 175 | S 27 IV | 1  | 3.2  | 5  | 7  | 8  | 15 |
| 176 |         | 2  | 6.2  | 4  | 4  | 3  | 7  |
| 177 |         | 3  | 9.2  | 5  | 11 | 17 | 28 |
| 178 |         | 4  | 12.2 | 13 | 14 | 15 | 29 |
| 179 |         | 5  | 15.2 | 7  | 11 | 19 | 30 |
| 180 |         | 6  | 18.2 | 13 | 15 | 24 | 39 |
| 181 |         | 7  | 21.2 | 9  | 18 | 23 | 41 |
| 182 |         | 8  | 24.2 | 7  | 9  | 14 | 23 |
| 183 |         | 9  | 27.2 | 8  | 14 | 21 | 35 |
| 184 |         | 10 | 30.2 | 5  | 11 | 13 | 24 |
| 185 |         | 11 | 33.2 | 8  | 14 | 24 | 38 |
| 186 |         | 12 | 36.2 | 5  | 13 | 15 | 28 |
| 187 |         | 13 | 39.2 | 7  | 9  | 13 | 22 |

|     |         |    |      |    |    |    |    |
|-----|---------|----|------|----|----|----|----|
| 188 | S 29 GA | 1  | 1.7  | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 189 |         | 2  | 4.7  | 2  | 1  | 1  | 2  |
| 190 |         | 3  | 7.7  | 1  | 1  | 2  | 3  |
| 191 |         | 4  | 10.7 | 1  | 2  | 2  | 4  |
| 192 |         | 5  | 13.7 | 1  | 1  | 1  | 2  |
| 193 |         | 6  | 16.7 | 1  | 1  | 1  | 2  |
| 194 |         | 7  | 19.7 | 1  | 0  | 1  | 1  |
| 195 |         | 8  | 22.7 | 4  | 13 | 17 | 30 |
| 196 |         | 9  | 25.7 | 9  | 21 | 29 | 50 |
| 197 |         | 10 | 28.7 | 28 | 44 | R  | R  |
| 198 | S30     | 1  | 1.7  | 10 | 14 | 9  | 23 |
| 199 |         | 2  | 3.2  | 3  | 4  | 7  | 11 |
| 200 |         | 3  | 4.7  | 2  | 3  | 4  | 7  |
| 201 |         | 4  | 6.2  | 9  | 13 | 18 | 31 |
| 202 |         | 5  | 9.2  | 27 | 38 | R  | R  |
| 203 | S32     | 1  | 1.6  | 39 | R  |    | R  |
| 204 |         | 2  | 3.1  | R  |    |    | R  |
| 205 |         | 3  | 4.7  | 25 | 42 | R  | R  |
| 206 |         | 4  | 6.1  | 36 | R  |    | R  |
| 207 |         | 5  | 9.2  | 20 | 35 | 48 | 83 |
| 208 |         | 6  | 12.2 | 16 | 29 | 36 | 65 |
| 209 |         | 7  | 15.1 | 24 | R  |    | R  |
| 210 |         | 8  | 18.2 | 21 | 33 | 44 | 77 |
| 211 |         | 9  | 21.2 | 19 | 30 | 37 | 67 |
| 212 |         | 10 | 24.2 | 25 | 39 | 47 | 86 |
| 213 |         | 11 | 30.1 | 35 | R  |    | R  |

*Tabella 1: Prove penetrometriche SPT.*

### 5.1.3 Prove dilatometriche

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state effettuate n.6 prove dilatometriche. Le prove e i risultati ottenuti sono state sintetizzate nelle Tabelle seguenti.

| DILATOMETRICHE |                 |          |         |
|----------------|-----------------|----------|---------|
| SONDAGGIO      | PROFONDITA' (m) | Ed (MPa) | E (MPa) |
| S5 GA          | 21.5            | 1241     | 1362    |
| S5 GA          | 26.5            | 996      | 1600    |
| S6 GA          | 26.5            | 1210     | 2447    |
| S6 GA          | 31.5            | 1045     | 2022    |
| S25 GA         | 20.5            | 1092     | 2236    |
| S25 GA         | 24.5            | 1302     | 3174    |

*Tabella 2: Risultati delle prove dilatometriche.*

#### 5.1.4 Prove di Permeabilità in foro

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state effettuate diverse prove di permeabilità di tipo Lefranc e Lugeon. Le prove e i risultati ottenuti sono state sintetizzati nelle Tabelle seguenti.

| LUGEON    |                |          |
|-----------|----------------|----------|
| BH        | Profondità (m) | k (m/s)  |
| S5 GA     | 32.00          | 2.90E-06 |
| S6 GA bis | 26.00          | 1.29E-05 |
| S6 GA bis | 31.00          | 8.66E-06 |

**Tabella 3: Risultati delle prove di permeabilità - LOGEON.**

| LEFRANC |                |          |
|---------|----------------|----------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  |
| S1 IV   | 5.50           | 2.60E-05 |
| S2 GA   | 9.50           | 1.50E-05 |
| S2 GA   | 17.50          | 2.40E-06 |
| S4 IV   | 7.25           | 5.20E-04 |
| S5 GA   | 19.5           | 6.20E-06 |
| S27 RI  | 2.75           | 8.50E-06 |
| S8 GA   | 7.25           | 4.30E-06 |
| S8 GA   | 10.25          | 3.70E-05 |
| S9 GA   | 1.9            | 5.80E-05 |
| S9 GA   | 7.5            | 7.10E-05 |
| S10 IV  | 7.25           | 1.40E-05 |
| S11 IV  | 3.25           | 2.20E-05 |
| S12 GA  | 20.25          | 1.40E-05 |
| S12 GA  | 25.25          | 1.10E-05 |
| S13 IV  | 3.25           | 1.30E-05 |
| S14 GA  | 8              | 9.80E-05 |
| S14 GA  | 12.5           | 1.40E-04 |
| S15 GA  | 5.5            | 1.10E-04 |
| S15 GA  | 9.6            | 4.40E-05 |
| S16 RI  | 1.75           | 2.10E-04 |
| S17 IV  | 6.5            | 4.70E-06 |
| S18 IV  | 2.25           | 6.80E-05 |
| S19 IV  | 2.25           | 9.60E-06 |
| S20 IV  | 2.75           | 3.30E-05 |
| S21 IV  | 2.75           | 9.20E-07 |
| S22 IV  | 8.65           | 1.30E-05 |
| S23 GA  | 2.25           | 1.20E-04 |
| S23 GA  | 8.25           | 5.90E-05 |
| S25 GA  | 5.5            | 1.00E-04 |
| S25 GA  | 10.5           | 6.80E-05 |
| S26 IV  | 1.75           | 2.00E-04 |
| S27 IV  | 5.25           | 8.30E-07 |
| S29 GA  | 10.25          | 3.90E-06 |
| S29 GA  | 15.25          | 1.20E-05 |
| S30 IV  | 2              | 9.30E-06 |
| S32     | 2.75           | 6.90E-05 |

**Tabella 4: Risultati delle prove di permeabilità - LEFRANC.**

### 5.1.5 Piezometria

Per il monitoraggio della falda, alcuni sondaggi sono stati attrezzati con piezometro (vedi tabelle precedenti).

Le letture eseguite sono riportate nella Tabella seguente.

| ALBATE-MOLTENO-LECCO | Letture 1   | Letture 2          |
|----------------------|---|--------------------|
|                      | 28/01/2023  | 27/02/2023         |
| SONDAGGIO            | FALDA<br>m. da p.c  | FALDA<br>m. da p.c |
| S1                   | 13.25   | 13.16              |
| S4                   | 7.85  | 8.07               |
| S10                  | 4.18  | 4.28               |
| S13                  | Proprietà privata non accessibile alla data del rilievo. Ottenuti i permessi per accedere | 34.22              |
| S16                  | Proprietà privata e chiusino con lucchetto  | 15.33              |
| S17                  | 12.85   | 12.95              |
| S19                  | 0.20  | 0.20               |
| S21                  | 5.02  | 5.53               |
| S23                  | Proprietà privata non accessibile alla data del rilievo                                   | 21.53              |
| S24                  | 2.70  | 2.60               |
| S26                  | 7.26  | 8.06               |
| S27                  | 26.46   | 26.25              |

*Tabella 5: Letture del livello di falda eseguite nei sondaggi.*

### 5.1.6 Prelievo dei campioni indisturbati e rimaneggiati

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono stati prelevati n. 81 campioni totali per lo più rimaneggiati; distribuzione e modalità di prelievo dei campioni in questione sono elencate nella tabella che segue.

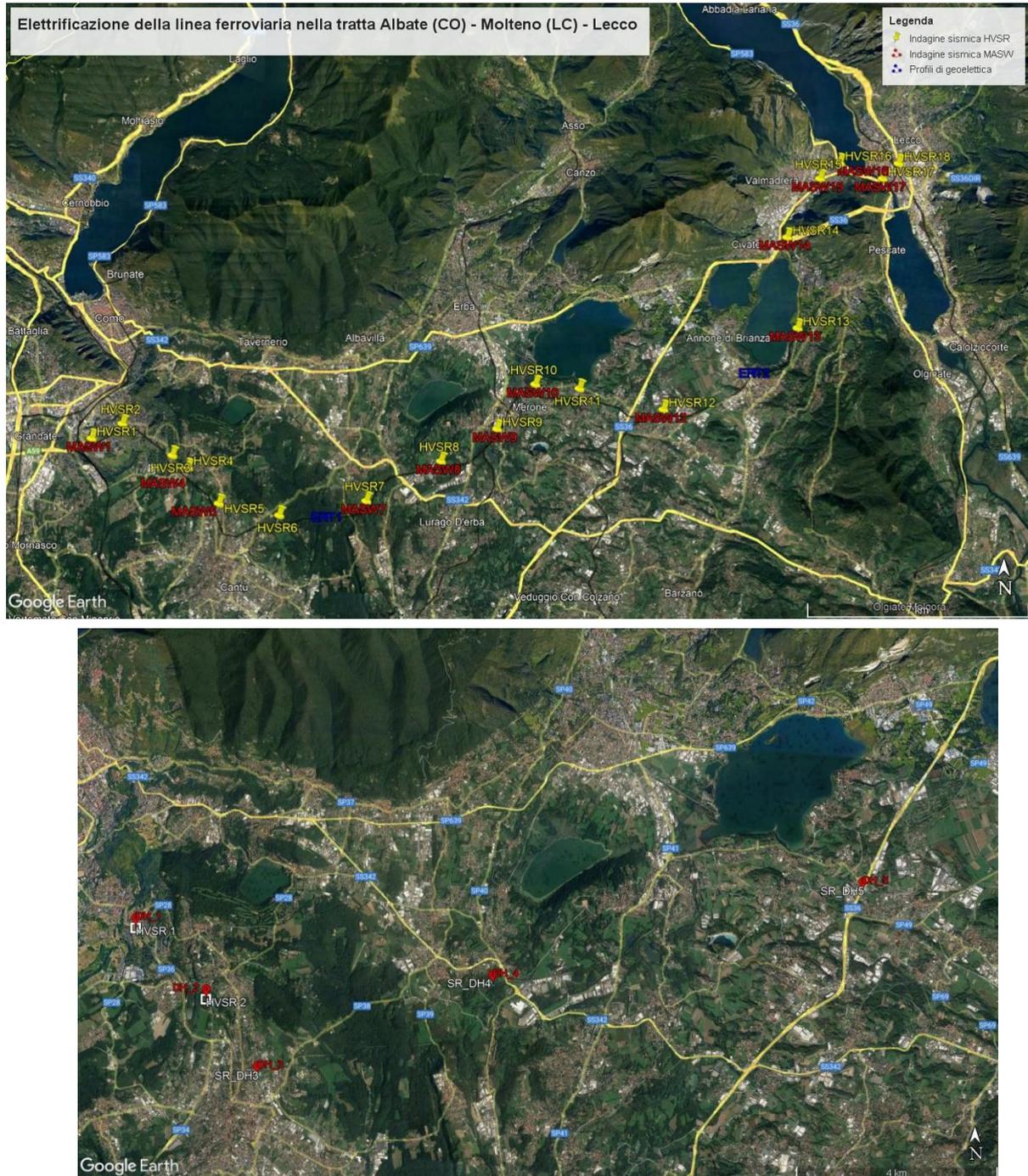
| ID | sondaggio | Campioni | Prof. media (m) |
|----|-----------|----------|-----------------|
| 1  | S1IV      | CR1      | 3.45            |
| 2  | S1IV      | CR2      | 13.75           |
| 3  | S1IV      | CR3      | 27.75           |
| 4  | S1IV      | CR4      | 32.75           |
| 5  | S4IV      | CR1      | 4.25            |
| 6  | S4IV      | CR2      | 11.25           |
| 8  | S5GA      | CR2      | 10.25           |
| 9  | S5GA      | CR3      | 15.25           |
| 10 | S5GA      | CR4      | 20.25           |
| 11 | S5GA      | CR5      | 25.25           |
| 12 | S5GA      | CR6      | 30.25           |
| 13 | S5GA      | CR7      | 33.25           |
| 14 | S5GA      | CR8      | 36.25           |
| 16 | S6GA      | CR1      | 5.25            |
| 17 | S6GA      | CR2      | 10.25           |
| 18 | S6GA      | CR3      | 15.25           |
| 19 | S6GA      | CR4      | 20.25           |
| 20 | S6GA      | CR5      | 25.25           |
| 21 | S6GA      | CR6      | 30.25           |
| 22 | S6GA      | CR7      | 33.25           |
| 23 | S6GA      | CR8      | 36.25           |
| 24 | S6GA      | CR9      | 39.25           |
| 25 | S6GA      | CR10     | 42.25           |
| 26 | S7RI      | CR1      | 5.75            |
| 27 | S7RI      | CR2      | 15.25           |
| 28 | S7RI      | CR3      | 25.75           |
| 29 | S8GA      | CR1      | 5.20            |
| 30 | S8GA      | CR2      | 10.20           |
| 31 | S8GA      | CR3      | 13.20           |
| 32 | S8GA      | CR4      | 16.20           |
| 33 | S8GA      | CR5      | 19.20           |
| 34 | S8GA      | CR6      | 22.20           |
| 35 | S8GA      | CR7      | 25.20           |
| 36 | S10IV     | CR1      | 8.25            |
| 37 | S10IV     | CR2      | 13.75           |
| 38 | S10IV     | CR3      | 17.25           |
| 39 | S11_RI    | CR1      | 3.75            |
| 40 | S11_RI    | CR2      | 12.75           |
| 41 | S11_RI    | CR3      | 21.25           |

|    |       |      |       |
|----|-------|------|-------|
| 42 | S13IV | CR1  | 3.75  |
| 43 | S13IV | CR2  | 9.75  |
| 44 | S13IV | CR3  | 30.25 |
| 45 | S15GA | CR1  | 5.25  |
| 46 | S15GA | CR2  | 10.25 |
| 47 | S15GA | CR3  | 13.25 |
| 48 | S15GA | CR4  | 16.25 |
| 49 | S15GA | CR5  | 19.25 |
| 50 | S15GA | CR6  | 22.25 |
| 51 | S15GA | CR7  | 25.25 |
| 52 | S16RI | SPT1 | 3.23  |
| 53 | S16RI | CL2  | 5.30  |
| 54 | S16RI | CL3  | 8.75  |
| 55 | S16RI | CL4  | 14.65 |
| 56 | S17IV | CR1  | 2.75  |
| 57 | S17IV | CR2  | 6.25  |
| 58 | S17IV | CR3  | 18.60 |
| 59 | S17IV | CR4  | 27.60 |
| 60 | S20IV | CR1  | 4.75  |
| 61 | S20IV | CR2  | 11.75 |
| 62 | S20IV | CR3  | 17.75 |
| 63 | S21IV | CR1  | 9.75  |
| 64 | S21IV | CR3  | 14.75 |
| 65 | S21IV | CR4  | 36.45 |
| 66 | S22IV | CR1  | 3.23  |
| 67 | S22IV | CR2  | 6.10  |
| 68 | S22IV | SH1  | 14.45 |
| 69 | S24IV | CR1  | 4.75  |
| 70 | S24IV | CR2  | 12.70 |
| 71 | S24IV | CR3  | 28.85 |
| 72 | S27IV | CR1  | 5.25  |
| 73 | S27IV | CR2  | 11.25 |
| 74 | S27IV | CR10 | 15.25 |
| 75 | S29GA | CR1  | 5.25  |
| 76 | S29GA | CR2  | 10.25 |
| 77 | S29GA | CR3  | 13.25 |
| 78 | S29GA | CR4  | 16.25 |
| 79 | S29GA | CR5  | 19.25 |
| 80 | S29GA | CR6  | 22.25 |
| 81 | S29GA | CR7  | 25.25 |

*Tabella 6: Campioni prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi geonostici.*

## 5.2 INDAGINI GEOFISICHE

Nell'ambito della presente progettazione, sono state eseguite le seguenti indagini geoelettiche e sismiche di superficie con metodo passivo (HVSr), di superficie con metodo attivo (MASW) e in foro (DH) in modo tale da poter stimare la  $V_{seq}$  e la risposta sismica locale in base alla normativa vigente (DM 17 gennaio 2018 - NTC2018 Norme Tecniche sulle Costruzioni). L'ubicazione delle indagini geofisiche è riportata di seguito.



*Figura 4: Ubicazione delle indagini geofisiche eseguite.*

Nello specifico sono state eseguite:

- n. 21 prospezioni MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves);
- n. 23 HVSR (Horizontal to Vertical Noise Ratio);
- n. 2 DH (Down-Hole);
- n. 3 SR (Sismica a rifrazione 2D).

I valori di  $V_{s,eq}$  ricavati dalle prove geofisiche, calcolati per  $H = 30$  m ( $H$  spessore delle terre poste al di sopra del substrato di riferimento rigido 800 m/s) e l'appartenenza al tipo di sottosuolo sono riportati di seguito.

| Prova    | $V_{s,eq}$ [m/s] | Categoria |
|----------|------------------|-----------|
| MASW1    | 286.37           | C         |
| MASW2    | 304.25           | C         |
| MASW3    | 425.38           | B         |
| MASW4    | 485.72           | B         |
| MASW5    | 367.51           | B         |
| MASW6    | 367.67           | B         |
| MASW7    | 375.3            | B         |
| MASW8    | 329.65           | C         |
| MASW9    | 494.25           | B         |
| MASW10   | 434.32           | B         |
| MASW11   | 372.29           | B         |
| MASW12   | 236.21           | C         |
| MASW13   | 361.89           | B         |
| MASW14   | 365.97           | B         |
| MASW15   | 301.89           | C         |
| MASW16   | 340.59           | C         |
| MASW17   | 250.71           | C         |
| MASW18   | 390.84           | B         |
| DH1      | 491.14           | B         |
| DH2      | 472.32           | B         |
| MASW_DH3 | 385.94           | B         |
| MASW_DH4 | 444.36           | B         |
| MASW_DH5 | 412.19           | B         |

### 5.3 PROVE DI LABORATORIO

Sui campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati dai sondaggi sono state eseguite le prove di laboratorio geotecnico, i cui risultati sono sintetizzati a seguire.

| sondaggio | Campioni ID | Prof. (m) |      | z media (m) | $\gamma$ (kN/mc) | Gs (-) | Wl (%) | Wp (%) | Ip (%) | G (%) | S (%) | L (%) | A (%) |
|-----------|-------------|-----------|------|-------------|------------------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| S1IV      | CR1         | 3.2       | 3.7  | 3.45        |                  | 2.7    |        |        |        | 1.4   | 66.7  | 23.4  | 8.5   |
| S1IV      | CR2         | 13.5      | 14   | 13.75       |                  | 2.71   |        |        |        | 1.7   | 38    | 47.4  | 13.2  |
| S1IV      | CR3         | 27.5      | 28   | 27.75       |                  | 2.71   | 24.3   | 18.9   | 5.4    | 8.3   | 47.4  | 34.8  | 9.5   |
| S1IV      | CR4         | 32.5      | 33   | 32.75       |                  | 2.66   | 22.3   | 15.4   | 6.9    | 17.6  | 38.8  | 32.8  | 10.8  |
| S4IV      | CR1         | 4         | 4.5  | 4.25        |                  | 2.6    | 23.7   | 18.5   | 5.2    | 24.9  | 37.6  | 29.2  | 8.3   |
| S4IV      | CR2         | 11        | 11.5 | 11.25       |                  | 2.72   |        |        |        | 54.6  | 38.3  |       |       |
| S5GA      | CR2         | 10        | 10.5 | 10.25       |                  | 2.72   |        |        |        | 47.9  | 34.3  | 11.8  | 6     |
| S5GA      | CR3         | 15        | 15.5 | 15.25       | 25.7             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S5GA      | CR4         | 20        | 20.5 | 20.25       |                  | 2.7    | 35.4   | 23.2   | 12.2   | 26.9  | 13.3  | 35.2  | 24.6  |
| S5GA      | CR5         | 25        | 25.5 | 25.25       | 25               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S5GA      | CR6         | 30        | 30.5 | 30.25       | 25.2             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S5GA      | CR7         | 33        | 33.5 | 33.25       | 25.2             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S5GA      | CR8         | 36        | 36.5 | 36.25       | 25               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR1         | 5         | 5.5  | 5.25        |                  | 2.64   | 26.6   | 20.3   | 6.3    | 31.8  | 37.8  | 23    | 7.4   |
| S6GA      | CR2         | 10        | 10.5 | 10.25       |                  | 2.61   | 37.1   | 27     | 10.1   | 1     | 56.1  | 31.7  | 11.2  |
| S6GA      | CR3         | 15        | 15.5 | 15.25       | 19.4             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR4         | 20        | 20.5 | 20.25       | 24               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR5         | 25        | 25.5 | 25.25       | 23.3             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR6         | 30        | 30.5 | 30.25       | 24.4             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR7         | 33        | 33.5 | 33.25       | 25               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR8         | 36        | 36.5 | 36.25       | 24.4             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR9         | 39        | 39.5 | 39.25       | 25               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S6GA      | CR10        | 42        | 42.5 | 42.25       | 25.1             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S7RI      | CR1         | 5.5       | 6    | 5.75        |                  | 2.61   | 36     | 26.9   | 9.1    | 49.2  | 30.3  | 12.1  | 8.4   |
| S7RI      | CR2         | 15        | 15.5 | 15.25       |                  | 2.61   |        |        |        | 16.7  | 57.3  | 19.5  | 6.5   |
| S7RI      | CR3         | 25.5      | 26   | 25.75       |                  | 2.63   |        |        |        | 13.5  | 58    | 18.9  | 9.6   |
| S8GA      | CR1         | 5         | 5.4  | 5.20        |                  | 2.71   | 21.8   | 15.6   | 6.2    | 29.2  | 34.3  | 27.7  | 8.8   |
| S8GA      | CR2         | 10        | 10.4 | 10.20       |                  | 2.67   |        |        |        | 57.1  | 31.6  | 7     | 4.3   |
| S8GA      | CR3         | 13        | 13.4 | 13.20       |                  | 2.64   |        |        |        | 37.1  | 36.4  | 18    | 8.5   |
| S8GA      | CR4         | 16        | 16.4 | 16.20       |                  | 2.6    | 25.8   | 16.1   | 9.7    | 34.7  | 19.9  | 31.3  | 14.4  |
| S8GA      | CR5         | 19        | 19.4 | 19.20       |                  | 2.7    |        |        |        | 69.3  | 23.9  |       |       |
| S8GA      | CR6         | 22        | 22.4 | 22.20       |                  | 2.64   |        |        |        | 48.3  | 33.7  | 14.4  | 3.6   |
| S8GA      | CR7         | 25        | 25.4 | 25.20       |                  | 2.66   |        |        |        | 24.7  | 42.6  | 24.5  | 8.2   |
| S10V      | CR1         | 8         | 8.5  | 8.25        |                  | 2.63   |        |        |        | 17.3  | 40.9  | 31.6  | 10.2  |
| S10V      | CR2         | 13.5      | 14   | 13.75       |                  | 2.65   | 26.5   | 16.1   | 10.4   | 42.4  | 25.8  | 18.4  | 13.4  |
| S10V      | CR3         | 17        | 17.5 | 17.25       | 25.6             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S11_RI    | CR1         | 3.5       | 4    | 3.75        |                  | 2.6    |        |        |        | 17.2  | 43.4  | 30.8  | 8.6   |
| S11_RI    | CR2         | 12.5      | 13   | 12.75       |                  | 2.6    | 40.9   | 27.8   | 13.1   | 13.1  | 42.2  | 30.2  | 14.5  |
| S11_RI    | CR3         | 21        | 21.5 | 21.25       |                  | 2.64   | 28.2   | 19.6   | 8.6    | 23.4  | 41.4  | 24.3  | 10.8  |
| S13IV     | CR1         | 3.5       | 4    | 3.75        |                  | 2.65   | 23.1   | 16.9   | 6.2    | 39.8  | 34.9  | 17.8  | 7.5   |
| S13IV     | CR2         | 9.5       | 10   | 9.75        |                  | 2.71   | 20.6   | 15.1   | 5.5    | 44.9  | 38    | 11.2  | 5.9   |
| S13IV     | CR3         | 30        | 30.5 | 30.25       |                  | 2.61   | 22.3   | 15.5   | 6.8    | 4     | 65.2  | 21.2  | 9.6   |
| S15GA     | CR1         | 5         | 5.5  | 5.25        | 20.4             | 2.68   | 23.3   | 15.8   | 7.5    | 3.8   | 23.5  | 54.4  | 18.3  |
| S15GA     | CR2         | 10        | 10.5 | 10.25       |                  | 2.71   |        |        |        | 56    | 31.6  | 9     | 3.4   |
| S15GA     | CR3         | 13        | 13.5 | 13.25       |                  | 2.63   |        |        |        | 22.7  | 43.1  | 22.2  | 12    |
| S15GA     | CR4         | 16        | 16.5 | 16.25       |                  | 2.72   |        |        |        | 43.1  | 38    | 13    | 5.9   |
| S15GA     | CR5         | 19        | 19.5 | 19.25       |                  | 2.72   | 24.7   | 13.5   | 11.2   | 65.1  | 18.3  | 9.2   | 7.4   |
| S15GA     | CR6         | 22        | 22.5 | 22.25       |                  | 2.67   | 25     | 13.8   | 11.2   | 54.6  | 25    | 10.5  | 9.9   |
| S15GA     | CR7         | 25        | 25.5 | 25.25       |                  | 2.68   | 22.1   | 14.4   | 7.7    | 51.2  | 29.3  | 12.5  | 7     |
| S16RI     | SPT1        | 3         | 3.45 | 3.23        |                  | 2.6    | 27.2   | 19.1   | 8.1    | 18.8  | 12.5  | 51.9  | 16.8  |
| S16RI     | CL2         | 5         | 5.6  | 5.30        | 19.1             | 2.62   | 26.1   | 17.3   | 8.8    | 3.1   | 6.7   | 67.2  | 23    |
| S16RI     | CL3         | 8.5       | 9    | 8.75        |                  |        | 22.1   | 16.7   | 5.4    | 50.2  | 29.5  | 15.5  | 4.8   |
| S16RI     | CL4         | 14.5      | 14.8 | 14.65       | 25.8             | 2.67   |        |        |        |       |       |       |       |
| S17IV     | CR1         | 2.5       | 3    | 2.75        |                  | 2.68   | 34     | 20     | 14     | 40.7  | 18.3  | 22.8  | 18.2  |
| S17IV     | CR2         | 6         | 6.5  | 6.25        | 25.3             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S17IV     | CR3         | 18.3      | 18.9 | 18.60       | 25.4             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S17IV     | CR4         | 27.4      | 27.8 | 27.60       | 25.1             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S20V      | CR1         | 4.5       | 5    | 4.75        |                  | 2.66   |        |        |        | 32.9  | 41.3  | 19.2  | 6.6   |
| S20V      | CR2         | 11.5      | 12   | 11.75       |                  | 2.7    |        |        |        | 21    | 54.1  | 17.7  | 7.2   |
| S20V      | CR3         | 17.5      | 18   | 17.75       |                  | 2.64   |        |        |        | 52.7  | 19.2  | 14.3  | 13.8  |
| S21IV     | CR1         | 9.5       | 10   | 9.75        |                  | 2.66   | 20.3   | 14     | 6.3    | 21.9  | 29    | 34.3  | 14.8  |
| S21IV     | CR3         | 14.5      | 15   | 14.75       |                  | 2.72   |        |        |        | 25.5  | 34.9  | 30.8  | 8.8   |
| S21IV     | CR4         | 36.3      | 36.6 | 36.45       | 26               |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S22IV     | CR1         | 3         | 3.45 | 3.23        |                  | 2.69   | 19.2   | 12.8   | 6.4    | 4.1   | 18.2  | 50.9  | 26.8  |
| S22IV     | CR2         | 6         | 6.2  | 6.10        |                  | 2.67   | 20.5   | 12.6   | 7.9    | 44.6  | 44.7  | 3.9   | 6.8   |
| S22IV     | SH1         | 14.2      | 14.7 | 14.45       | 20.2             | 2.66   | 26.7   | 17     | 9.7    | 6.6   | 12.8  | 55.9  | 24.7  |
| S24IV     | CR1         | 4.5       | 5    | 4.75        |                  | 2.65   | 30.6   | 21.1   | 9.5    | 5.5   | 6.9   | 69.1  | 18.5  |
| S24IV     | CR2         | 12.4      | 13   | 12.70       | 26.3             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S24IV     | CR3         | 28.7      | 29   | 28.85       | 26.3             |        |        |        |        |       |       |       |       |
| S27IV     | CR1         | 5         | 5.5  | 5.25        |                  | 2.7    |        |        |        | 1.6   | 78.4  | 13.8  | 6.2   |
| S27IV     | CR2         | 11        | 11.5 | 11.25       |                  | 2.67   |        |        |        | 14.6  | 72.6  | 9.2   | 3.6   |
| S27IV     | CR10        | 15        | 15.5 | 15.25       |                  | 2.7    |        |        |        | 15    | 60.9  | 15.5  | 8.6   |
| S29GA     | CR1         | 5         | 5.5  | 5.25        |                  | 2.67   |        |        |        | 0     | 56.5  | 31.8  | 11.7  |
| S29GA     | CR2         | 10        | 10.5 | 10.25       |                  | 2.67   | 21.4   | 13.1   | 8.3    | 0     | 29.6  | 47.9  | 22.5  |
| S29GA     | CR3         | 13        | 13.5 | 13.25       |                  | 2.69   |        |        |        | 7.4   | 54.3  | 29.5  | 8.8   |
| S29GA     | CR4         | 16        | 16.5 | 16.25       |                  | 2.64   | 22.8   | 15     | 7.8    | 0.8   | 36.8  | 38.2  | 24.2  |
| S29GA     | CR5         | 19        | 19.5 | 19.25       |                  | 2.64   | 25.4   | 16     | 9.4    | 3.2   | 18.2  | 49    | 29.6  |
| S29GA     | CR6         | 22        | 22.5 | 22.25       |                  | 2.69   |        |        |        | 62.4  | 26.5  | 8.1   | 3     |
| S29GA     | CR7         | 25        | 25.5 | 25.25       |                  | 2.73   |        |        |        | 46.4  | 40.1  | 9.7   | 3.8   |



**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA ALBATE-MOLTENO-LECCO**

RELAZIONE GEOTECNICA

COMMESSA LOTTO CODIFICA DOCUMENTO REV. FOGLIO  
LC00 01 R 26 GE OC0000 001 A 30 di 133

| sondaggio | Campioni | Prof. (m) |      | z media (m) | Misure di velocita sonica |          |       |            | Compressione Monoassiale |            |            |       | Trazione diretta |            |            | Point Load Test |              |               |     |
|-----------|----------|-----------|------|-------------|---------------------------|----------|-------|------------|--------------------------|------------|------------|-------|------------------|------------|------------|-----------------|--------------|---------------|-----|
|           |          | da        | a    |             | Vp (m/s)                  | Vs (m/s) | v (-) | Edin (MPa) | σ (MPa)                  | Esec (MPa) | Etan (MPa) | v (-) | σmin (MPa)       | σmed (MPa) | σmax (MPa) | Is50min (MPa)   | Is0med (MPa) | Is50max (MPa) |     |
| S11V      | CR1      | 3.2       | 3.7  | 3.45        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11V      | CR2      | 13.5      | 14   | 13.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11V      | CR3      | 27.5      | 28   | 27.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11V      | CR4      | 32.5      | 33   | 32.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S41V      | CR1      | 4         | 4.5  | 4.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S41V      | CR2      | 11        | 11.5 | 11.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR2      | 10        | 10.5 | 10.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR3      | 15        | 15.5 | 15.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR4      | 20        | 20.5 | 20.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR5      | 25        | 25.5 | 25.25       | 2456                      | 1598     | 0.13  | 14746      | 36.49                    | 4531       | 4315       | 0.12  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR6      | 30        | 30.5 | 30.25       | 2419                      | 1502     | 0.19  | 13756      | 25.69                    | 4081       | 3857       | 0.15  | 1.81             | 2.09       | 2.24       |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR7      | 33        | 33.5 | 33.25       | 2392                      | 1570     | 0.12  | 14206      | 37.15                    | 4438       | 4272       | 0.15  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S5GA      | CR8      | 36        | 36.5 | 36.25       | 2074                      | 1016     | 0.34  | 7058       | 8.9                      | 1976       | 2741       | 0.29  | 2.78             | 2.98       | 3.2        |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR1      | 5         | 5.5  | 5.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR2      | 10        | 10.5 | 10.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR3      | 15        | 15.5 | 15.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR4      | 20        | 20.5 | 20.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 | 0.12         | 0.16          | 0.2 |
| S6GA      | CR5      | 25        | 25.5 | 25.25       | 1741                      | 1073     | 0.19  | 6894       | 24.63                    | 2067       | 3343       | 0.34  |                  |            |            | 0.39            | 0.41         | 0.43          |     |
| S6GA      | CR6      | 30        | 30.5 | 30.25       | 2273                      | 1328     | 0.24  | 10893      | 34.02                    | 3871       | 6190       | 0.27  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR7      | 33        | 33.5 | 33.25       | 2446                      | 1575     | 0.15  | 14494      | 29.82                    | 4410       | 4075       | 0.22  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR8      | 36        | 36.5 | 36.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR9      | 39        | 39.5 | 39.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S6GA      | CR10     | 42        | 42.5 | 42.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S7RI      | CR1      | 5.5       | 6    | 5.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S7RI      | CR2      | 15        | 15.5 | 15.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S7RI      | CR3      | 25.5      | 26   | 25.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR1      | 5         | 5.4  | 5.20        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR2      | 10        | 10.4 | 10.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR3      | 13        | 13.4 | 13.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR4      | 16        | 16.4 | 16.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR5      | 19        | 19.4 | 19.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR6      | 22        | 22.4 | 22.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S8GA      | CR7      | 25        | 25.4 | 25.20       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S10IV     | CR1      | 8         | 8.5  | 8.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S10IV     | CR2      | 13.5      | 14   | 13.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S10IV     | CR3      | 17        | 17.5 | 17.25       | 3467                      | 1972     | 0.26  | 25592      | 57.69                    | 13792      | 13316      | 0.28  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11_RI    | CR1      | 3.5       | 4    | 3.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11_RI    | CR2      | 12.5      | 13   | 12.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S11_RI    | CR3      | 21        | 21.5 | 21.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S13IV     | CR1      | 3.5       | 4    | 3.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S13IV     | CR2      | 9.5       | 10   | 9.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S13IV     | CR3      | 30        | 30.5 | 30.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR1      | 5         | 5.5  | 5.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR2      | 10        | 10.5 | 10.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR3      | 13        | 13.5 | 13.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR4      | 16        | 16.5 | 16.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR5      | 19        | 19.5 | 19.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR6      | 22        | 22.5 | 22.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S15GA     | CR7      | 25        | 25.5 | 25.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S16RI     | SPT1     | 3         | 3.45 | 3.23        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S16RI     | CL2      | 5         | 5.6  | 5.30        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S16RI     | CL3      | 8.5       | 9    | 8.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S16RI     | CL4      | 14.5      | 14.8 | 14.65       | 4507                      | 2545     | 0.27  | 43136      | 36.66                    | 22523      | 26498      | 0.2   |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S17IV     | CR1      | 2.5       | 3    | 2.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S17IV     | CR2      | 6         | 6.5  | 6.25        | 3486                      | 1956     | 0.27  | 25074      | 45.16                    | 13151      | 10186      | 0.15  | 3.46             | 4.41       | 5.49       |                 |              |               |     |
| S17IV     | CR3      | 18.3      | 18.9 | 18.60       | 3340                      | 2047     | 0.2   | 26036      | 47.57                    | 15292      | 11524      | 0.2   | 3.39             | 4.93       | 5.81       |                 |              |               |     |
| S17IV     | CR4      | 27.4      | 27.8 | 27.60       | 3223                      | 1993     | 0.19  | 24196      | 37.99                    | 11602      | 8527       | 0.2   | 3.52             | 4.73       | 5.69       |                 |              |               |     |
| S20IV     | CR1      | 4.5       | 5    | 4.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S20IV     | CR2      | 11.5      | 12   | 11.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S20IV     | CR3      | 17.5      | 18   | 17.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S21IV     | CR1      | 9.5       | 10   | 9.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S21IV     | CR3      | 14.5      | 15   | 14.75       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S21IV     | CR4      | 36.3      | 36.6 | 36.45       |                           |          |       |            |                          |            |            |       | 1.5              | 1.69       | 1.88       |                 |              |               |     |
| S22IV     | CR1      | 3         | 3.45 | 3.23        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S22IV     | CR2      | 6         | 6.2  | 6.10        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S22IV     | SH1      | 14.2      | 14.7 | 14.45       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S24IV     | CR1      | 4.5       | 5    | 4.75        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S24IV     | CR2      | 12.4      | 13   | 12.70       | 4900                      | 3089     | 0.17  | 59831      | 144.46                   | 46646      | 49710      | 0.18  | 11.44            | 14.67      | 16.65      |                 |              |               |     |
| S24IV     | CR3      | 28.7      | 29   | 28.85       |                           |          |       |            | 56.9                     | 30192      | 29392      | 0.25  |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S27IV     | CR1      | 5         | 5.5  | 5.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S27IV     | CR2      | 11        | 11.5 | 11.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S27IV     | CR10     | 15        | 15.5 | 15.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR1      | 5         | 5.5  | 5.25        |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR2      | 10        | 10.5 | 10.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR3      | 13        | 13.5 | 13.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR4      | 16        | 16.5 | 16.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR5      | 19        | 19.5 | 19.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR6      | 22        | 22.5 | 22.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |
| S29GA     | CR7      | 25        | 25.5 | 25.25       |                           |          |       |            |                          |            |            |       |                  |            |            |                 |              |               |     |

*Tabella 7: Sintesi dei risultati delle prove in laboratorio eseguite sui campioni prelevati.*

## 6 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Si riportano, nei paragrafi che seguono, le modalità seguite per l'interpretazione dei risultati delle indagini svolte.

### 6.1 TERRENI A GRANA GROSSA (SABBIE E GHIAIE)

La caratterizzazione dei terreni a grana grossa avverrà essenzialmente ai risultati delle prove in sito, in particolare in base ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche (SPT).

Le prove SPT che hanno restituito  $\frac{N1}{N3} > \frac{N2}{N3}$  non possono essere considerate affidabili (Schmertmann 1979) e pertanto non verranno prese in considerazione.

#### 6.1.1 Classificazione

La classificazione di questi terreni avverrà essenzialmente sui risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- Analisi granulometriche
- Pesì specifico dei grani e dell'unità di volume

#### 6.1.2 Stato di addensamento ( $D_R$ )

a) Gibbs e Holtz (1957)

$$D_R = 1.5 \cdot \left( \frac{N_{60}}{F} \right)^{0.222} - 0.6$$

$$F = 0.65 \cdot \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^2 + 16.8 \cdot \left( \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) + 14$$

b) Meyerhof (1957)

$$D_R = 0.21 \cdot \left( \frac{N_{60}}{\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} + 0.7} \right)^{0.5}$$

c) Yoshida e Kokuso (1988)

$$D_R = 0.22 \cdot N_{60}^{0.57} \cdot \left( 100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{-0.14} \quad \text{sabbia fine}$$

$$D_R = 0.18 \cdot N_{60}^{0.57} \cdot \left( 100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{-0.14} \quad \text{sabbia 75\% ghiaia 25\%}$$

$$D_R = 0.25 \cdot N_{60}^{0.44} \cdot \left( 100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{-0.13} \quad \text{sabbia 50\% ghiaia 50\%}$$

$$D_R = 0.25 \cdot N_{60}^{0.46} \cdot \left( 100 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{-0.12} \quad \text{tutti i terreni granulari}$$

d) Skempton (1989)

$$D_R = 100 \cdot \left( \frac{N_{1(60)}}{60} \right)^{0.5}$$

### 6.1.3 Caratteristiche di resistenza ( $\phi'$ )

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio dalle prove SPT sono state utilizzate correlazioni che passano per la stima della  $D_R$ , stimata come descritto nel paragrafo precedente, e correlazioni che forniscono direttamente l'angolo di attrito in funzione del numero di colpi. Alla coesione efficace viene attribuito un valore nullo.

#### a) Schmertmann (1977)

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| $\phi = 38.5 + 0.08 \cdot D_R$  | sabbia e ghiaia poco limosa e ghiaietto uniforme |
| $\phi = 34.5 + 0.10 \cdot D_R$  | sabbia grossa-media uniformemente ben gradata    |
| $\phi = 31.5 + 0.115 \cdot D_R$ | sabbia medio-fine uniformemente ben gradata      |
| $\phi = 28.0 + 0.14 \cdot D_R$  | sabbia fine uniforme                             |

essendo:  $D_r$  = densità relativa

#### b) Schmertmann (1975)

$$\phi = \arctan \left( \frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \cdot \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \right)^{0.34},$$

#### c) Hatanaka & Uchida (1996)

$$\phi = 20 + (15.4 \cdot N_{1(60)})^{0.5}$$

### 6.1.4 Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi incoerenti sono state stimate per mezzo delle prove geofisiche MASW e DH. Certamente anche dalle prove SPT è possibile definire le caratteristiche di deformabilità di un terreno. Avendo però a disposizione i risultati delle indagini sismiche, si è voluto procedere con la definizione del modulo elastico di progetto dei terreni attraverso la valutazione delle  $V_s$  direttamente, ovvero passando dalla definizione di modulo in condizioni dinamiche (praticamente a distorsioni nulle) piuttosto che attraverso delle correlazioni indirette basati sul numero di colpi delle SPT (valide in condizioni di rottura).

Dalle prove MASW e DH si può ricavare il modulo elastico dinamico di taglio  $G_0$  a livelli bassissimi di deformazione ( $\gamma < 10^{-7}$ ). In realtà l'esperienza mostra che nelle opere in sotterraneo si raggiungono valori della deformazione di taglio dell'ordine di  $10^{-3}$  e questo comporta una notevole riduzione dei valori dei moduli ottenuti dalle prove.

Dalle misure della velocità delle onde di taglio  $V_s$ , dunque, è stato valutato il valore iniziale del modulo di rigidezza a taglio  $G_0$  secondo la ben nota relazione della teoria dell'elasticità:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2$$

nella quale  $\rho$  è la densità del mezzo.

A partire da  $G_0$ , si ricava il modulo elastico dinamico  $E_0$  attraverso la seguente relazione:

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$$

è stato stimato il modulo di Young a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto di Poisson  $\nu = 0.45$ .

Per tenere conto del decadimento della rigidità dei terreni con il livello deformativo, i valori da adottare nei calcoli strutturali delle opere in oggetto sono poi stati stimati applicando un fattore riduttivo ai moduli a piccole deformazioni. Nello specifico:

- I moduli di deformabilità "operativi" ( $E'$ ) da adottare per il calcolo delle deformazioni/cedimenti delle opere di sostegno, saranno assunti pari a 1/5 di quello a piccole deformazioni da prove geofisiche ( $E_0$ ).
- Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati e fondazioni, i moduli elastici "operativi" saranno assunti pari a 1/10 di quello a piccole deformazioni da prove geofisiche ( $E_{op}' = E_0/10$ ).

### 6.1.5 Caratteristiche di permeabilità

La permeabilità è stata stimata per mezzo di prove di permeabilità in foro a carico variabile tipo Lefranc.

Nel corso della prova si è misurato l'abbassamento del livello idrico nel foro in funzione del tempo, dopo aver precedentemente riempito il foro fino a boccaforo.

Per le metodologie esecutive e di calcolo si è fatto riferimento alle Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geognostiche (AGI 1977).

In particolare, il calcolo del coefficiente di permeabilità è stato eseguito con la seguente relazione:

$$k = \frac{A}{Cl \cdot (t_2 - t_1)} * \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dove  $k$  = coefficiente di permeabilità (cm/sec)

$A$  = area di base del foro (cm<sup>2</sup>)

$h_1, h_2$  = altezza del livello d'acqua nel foro rispetto al livello falda o al fondo del foro ai tempi  $t_1$  e  $t_2$  (cm)

$t_1, t_2$  = tempi ai quali si misura  $h_1$  e  $h_2$  (sec)



**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA ALBATE-MOLTENO-LECCO**

RELAZIONE GEOTECNICA

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO    |
|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| LC00     | 01    | R 26 GE  | OC0000 001 | A    | 34 di 133 |

Cl = coefficiente di forma dipendente dal diametro D del foro di sondaggio e dalla lunghezza L del tratto di prova:

$$Cl = L \quad \text{per } L \gg D$$

$$Cl = 2 \cdot 3.14 \cdot D + L \quad \text{per } L \leq D$$

## 6.2 DEPOSITI COESIVI (LIMI E ARGILLE)

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana fine si è proceduto alla definizione dei parametri non drenati. In particolare, si è fatto riferimento ai risultati delle prove in sito (SPT), non essendo state condotte prove di laboratorio per la determinazione dei parametri di resistenza.

Le prove SPT che hanno restituito  $\frac{N1}{N3} > \frac{N2}{N3}$  non possono essere considerate affidabili (Schmertmann 1979) e pertanto non verranno prese in considerazione.

### 6.2.1 Classificazione

La classificazione di questi terreni avverrà essenzialmente sui risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- Analisi granulometriche
- Pesì specifico dei grani
- Limiti di Atterberg

### 6.2.2 Caratteristiche di resistenza ( $c_u$ )

La coesione non drenata è stata stimata a partire da prove speditive (Pocket Test) e dall'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

Nello specifico, a partire dal numero di colpo  $N_{SPT}$  è possibile ricavare la  $c_u$  mediante la correlazione di Stroud (1974):

$$c_u \cong (4.5 \div 5) \times N_{SPT} \quad (\text{kPa})$$

### 6.2.3 Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi incoerenti sono state stimate per mezzo delle prove geofisiche MASW e DH. Certamente anche dalle prove SPT è possibile definire le caratteristiche di deformabilità di un terreno. Avendo però a disposizione i risultati delle indagini sismiche, si è voluto procedere con la definizione del modulo elastico di progetto dei terreni attraverso la valutazione delle  $V_s$  direttamente, ovvero passando dalla definizione di modulo in condizioni dinamiche (praticamente a distorsioni nulle) piuttosto che attraverso delle correlazioni indirette basati sul numero di colpi delle SPT (valide in condizioni di rottura).

Dalle prove MASW e DH si può ricavare il modulo elastico dinamico di taglio  $G_0$  a livelli bassissimi di deformazione ( $\gamma < 10^{-7}$ ). In realtà l'esperienza mostra che nelle opere in sotterraneo si raggiungono valori della deformazione di taglio dell'ordine di  $10^{-3}$  e questo comporta una notevole riduzione dei valori dei moduli ottenuti dalle prove.

Dalle misure della velocità delle onde di taglio  $V_s$ , dunque, è stato valutato il valore iniziale del modulo di rigidezza a taglio  $G_0$  secondo la ben nota relazione della teoria dell'elasticità:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2$$

nella quale  $\rho$  è la densità del mezzo.

A partire da  $G_0$ , si ricava il modulo elastico dinamico  $E_0$  attraverso la seguente relazione:

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$$

è stato stimato il modulo di Young a piccole deformazioni  $E_0$ , assumendo un rapporto di Poisson  $\nu = 0.45$ .

Per tenere conto del decadimento della rigidità dei terreni con il livello deformativo, i valori da adottare nei calcoli strutturali delle opere in oggetto sono poi stati stimati applicando un fattore riduttivo ai moduli a piccole deformazioni. Nello specifico:

- I moduli di deformabilità "operativi" ( $E'$ ) da adottare per il calcolo delle deformazioni/cedimenti delle opere di sostegno, saranno assunti pari a 1/5 di quello a piccole deformazioni da prove geofisiche ( $E_0$ ).
- Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati e fondazioni, i moduli elastici "operativi" saranno assunti pari a 1/10 di quello a piccole deformazioni da prove geofisiche ( $E_{op}' = E_0/10$ ).

#### 6.2.4 Caratteristiche di permeabilità

La permeabilità è stata stimata per mezzo di prove di permeabilità in foro a carico variabile tipo Lefranc.

Nel corso della prova si è misurato l'abbassamento del livello idrico nel foro in funzione del tempo, dopo aver precedentemente riempito il foro fino a boccaforo.

Per le metodologie esecutive e di calcolo si è fatto riferimento alle Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geognostiche (AGI 1977).

In particolare, il calcolo del coefficiente di permeabilità è stato eseguito con la seguente relazione:

$$k = \frac{A}{Cl \cdot (t_2 - t_1)} * \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dove  $k$  = coefficiente di permeabilità (cm/sec)

$A$  = area di base del foro (cm<sup>2</sup>)

$h_1, h_2$  = altezza del livello d'acqua nel foro rispetto al livello falda o al fondo del foro ai tempi  $t_1$  e  $t_2$  (cm)

$t_1, t_2$  = tempi ai quali si misura  $h_1$  e  $h_2$  (sec)



**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA  
ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA ALBATE-MOLTENO-LECCO**

RELAZIONE GEOTECNICA

| COMMESSA | LOTTO | CODIFICA | DOCUMENTO  | REV. | FOGLIO    |
|----------|-------|----------|------------|------|-----------|
| LC00     | 01    | R 26 GE  | OC0000 001 | A    | 37 di 133 |

Cl = coefficiente di forma dipendente dal diametro D del foro di sondaggio e dalla lunghezza L del tratto di prova:

$$Cl = L \quad \text{per } L \gg D$$

$$Cl = 2 \cdot 3.14 \cdot D + L \quad \text{per } L \leq D$$

### 6.3 AMMASSI ROCCIOSI

#### 6.3.1 Classificazione

La classificazione di questi terreni avverrà essenzialmente sui risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- Pesì specifico dei grani

#### 6.3.2 Caratteristiche di resistenza

La resistenza a compressione degli ammassi rocciosi è stata stimata mediante prove di compressione monoassiale e di carico puntuale (Point Load Test); la resistenza a trazione attraverso prove di trazione indiretta (brasiliana).

Dalla prova di compressione monoassiale, la resistenza a compressione è stata calcolata mediante il rapporto tra il massimo carico  $P_{max}$  e l'area della sezione trasversale del provino:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A}$$

Le prove di carico puntuale sono state condotte su spezzoni di carota con diametri molto diversi da 50 mm, caricati parallelamente all'asse del campione, da cui è stato ricavato l'indice  $I_{s,50}$ :

$$I_{s,50} = \left(\frac{d}{50}\right)^{0.45} I_s$$

Dove:

d = diametro del provino (mm)

$I_s$  = indice di resistenza =  $\frac{P_{max}}{d^2}$

Dall'indice  $I_{s,50}$  è stata poi stimata la resistenza a compressione mediante la seguente relazione suggerita dall'ISRM (1985):

$$\sigma_c = 20 \div 25 I_{s,50}$$

Infine, la prova brasiliana permette di ricavare la resistenza a trazione mediante la seguente formula:

$$\sigma_t = -\frac{2P_l}{\pi d}$$

Dove:

$P_l$  = forza di compressione per unità di lunghezza applicata diametralmente

### 6.3.3 Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità degli ammassi rocciosi sono state stimate per mezzo di prove di laboratorio e in sito:

- Prove di compressione monoassiale
- Misure di velocità sonica
- Prove dilatometriche
- Geofisiche MASW e DH

Dalla prova di compressione monoassiale sono state determinate le costanti elastiche statiche della roccia mediante le seguenti espressioni:

$$E = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a}$$

$$\nu = - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$$

Le prove dilatometriche condotte nei sondaggi S5, S6 e S25 hanno permesso di valutare il modulo di Young E mediante il modulo dilatometrico  $E_d$  secondo la relazione seguente:

$$E = E_d (1 - 2\nu^2)$$

$$E_d = 2G(1 + \nu)$$

$$G = \frac{0.5\Delta P}{\Delta d} \Phi_{F,0}$$

Dove:

$\Delta P$  = incremento di carico

$\Phi_{F,0}$  = diametro iniziale del foro

Infine, dalle prove geofisiche MASW, DH e dalle misure di velocità sonica è stato ricavato il modulo elastico dinamico di taglio  $G_0$  a livelli bassissimi di deformazione ( $\gamma < 10^{-7}$ ). In realtà l'esperienza mostra che nelle opere in sotterraneo si raggiungono valori della deformazione di taglio dell'ordine di  $10^{-3}$  e questo comporta una notevole riduzione dei valori dei moduli ottenuti dalle prove.

Dalle misure della velocità delle onde di taglio  $V_s$ , dunque, è stato valutato il valore iniziale del modulo di rigidezza a taglio  $G_0$  secondo la ben nota relazione della teoria dell'elasticità:

$$G_0 = \rho \cdot v_s^2$$

nella quale  $\rho$  è la densità del mezzo.

A partire da  $G_0$ , si ricava il modulo elastico dinamico  $E_0$  attraverso la seguente relazione:

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$$

### 6.3.1 Caratteristiche di permeabilità

La permeabilità degli ammassi rocciosi è stata stimata per mezzo di prove di permeabilità di tipo LUGEON.

La prova si esegue immettendo acqua in pressione all'interno del foro di sondaggio; successivamente viene inserito un *packer* semplice o doppio che consentono di isolare la parte di foro da esaminare. Durante la prova, viene misurata la pressione iniezione, la portata massima e il tempo totale della prova.

Come per la prova di permeabilità Lefranc la normativa di riferimento è AGI (1977).

Il calcolo del coefficiente di permeabilità è stato eseguito con la seguente relazione:

$$k = \left(\frac{Q}{P_t}\right) \left(\frac{\gamma_w}{C}\right) \text{ m/s}$$

Dove:

k = coefficiente di permeabilità (m/s)

Q = portata assorbita dalla roccia (m<sup>3</sup>/s)

P<sub>t</sub> = pressione totale effettiva esistente in corrispondenza del baricentro del tratto di prova (kN/m<sup>2</sup>)

C = coefficiente di forma (m) (da AGI 1977) pari a:

$$C = 2\pi d \frac{A}{B}$$

$$A = \sqrt{\left(\frac{z}{d}\right)^2 - 1}$$

$$B = \ln\left(\frac{z}{d} + A\right)$$

Dove:

z = lunghezza del tratto di foro interessato dalla prova (m)

d = diametro del tratto di foro interessato dalla prova (m<sup>3</sup>/s)

## 7 AZIONE SIMICA DI PROGETTO

### 7.1 GENERALITÀ

Con riferimento alla normativa vigente (NTC-2018), le azioni sismiche di progetto si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR, come definite nel § 3.2.1 del D.M. 2018, nel periodo di riferimento VR, come definito nel § 2.4.3 del D.M. 2018. Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento PVR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Gli spettri di risposta di progetto sono stati definiti per tutti gli stati limite considerati, e, note la latitudine e la longitudine del sito, si sono ricavati i valori dei parametri necessari alla definizione dell'azione sismica e quindi del relativo spettro di risposta. Più avanti sono indicati i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

### 7.2 VITA NOMINALE

La vita nominale di un'opera strutturale  $V_N$  è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo al quale è destinata. Per la definizione della Vita Nominale da assegnare ad ogni singolo manufatto facente parte di una infrastruttura ferroviaria si rimanda al "MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI" - RFI DTC SI AM MA IFS 001 A del 28.03.2018.

| TIPO DI COSTRUZIONE <sup>(1)</sup>   | Vita Nominale<br>[ $V_N$ ] <sup>(1)</sup> |
|--|---|
| OPERE NUOVE SU INFRASTRUTTURE FERROVIARIE ESISTENTI OPERE NUOVE SU INFRASTRUTTURE FERROVIARIE PROGETTATE CON LE NORME VIGENTI PRIMA DEL DM 14/01/2008 A VELOCITÀ CONVENZIONALE ( $V < 250$ Km/h) | 50  |
| ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ ( $V < 250$ km/h)   | 75  |
| ALTRE OPERE NUOVE A VELOCITÀ ( $V \geq 250$ Km/h)  | 100                                       |
| OPERE DI GRANDI DIMENSIONI: PONTI E VIADOTTI CON CAMPATE DI LUCE MAGGIORE DI 150 m   | $\geq 100$ <sup>(2)</sup>                 |
| (1) - La medesima $V_N$ si applica anche ad apparecchi di appoggio, coprigiunti e impermeabilizzazione delle stesse opere.   |   |
| (2) - Da definirsi per il singolo progetto a cura di RFI.  |   |

**Tabella 8: Vita Nominale in funzione del tipo di costruzione.**

Tenendo conto delle indicazioni precedenti, le opere di progetto avranno Vita Nominale pari a:

$$V_N = 50 \text{ anni}$$

### 7.3 CLASSE D'USO

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

| TIPO DI COSTRUZIONE                                      | Classe d'uso | Coefficiente d'uso [C <sub>U</sub> ] |
|--|--------------|--------------------------------------|
| GRANDI STAZIONI  | C IV         | 2,0                                  |
| OPERE D'ARTE DEL SISTEMA DI GRANDE VIABILITÀ FERROVIARIA | C III        | 1,5                                  |
| ALTRE OPERE D'ARTE                                       | C II         | 1,0                                  |

**Tabella 9: Tabella Classe d'uso Coeff. d'uso in funzione del tipo di costruzione per l'infrastruttura ferroviaria.**

Con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso in presenza di azioni sismiche, le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita in base all'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. Tenendo conto delle

indicazioni precedenti, opere di progetto appartengono alla **Classe d'uso II, ad eccezione delle paratie in corrispondenza di Via Gaggio, le quali appartengono alla Classe d'uso III.**

Alla classe d'uso II corrisponde un coefficiente d'uso pari a:

$$C_U = 1$$

Alla classe d'uso III corrisponde un coefficiente d'uso pari a:

$$C_U = 1.5$$

#### 7.4 PERIODO DI RIFERIMENTO

Il periodo di riferimento  $V_R$  si ottiene moltiplicando la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ . Nel caso in esame:

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \times 1 = 50 \text{ anni}$$

$$V_R = V_N \times C_U = 50 \times 1.5 = 75 \text{ anni (Via Gaggio)}$$

L'azione sismica di progetto va quindi determinata in funzione degli Stati Limite di verifica e delle corrispondenti probabilità  $P_{VR}$  di realizzarsi nel periodo di riferimento  $V_R$ .

#### 7.5 VALUTAZIONE DEI PARAMETRI DI PERICOLOSITÀ SISMICA

Gli Stati Limite di riferimento per verifiche in presenza di sisma, così come definiti nelle NTC2018 al par. 3.2.1 sono:

- **Stati Limite Ultimi (SLU):**
  - Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, SLV, definito come lo stato limite in corrispondenza del quale la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
  - Stato Limite di Prevenzione del Collasso, SLC, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.
- **Stati limite di Esercizio (SLE):**
  - Stato Limite di immediata Operatività SLO per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico.
  - Stato Limite di Danno SLD definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo.

Il tempo di ritorno  $T_R$  dell'azione sismica di verifica è legato al periodo di riferimento  $V_R$  ed alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  dalla relazione:

$$T_R = - V_R / \ln(1-P_{VR})$$

Nel caso in esame, i valori di periodo di ritorno dell'azione sismica e le probabilità di superamento per i diversi Stati Limite sono mostrati nella tabella che segue.

| Stato limite di riferimento     |  | Probabilità di superamento $P_{VR}$ | Periodo di ritorno dell'azione sismica $T_R$ per $V_r=50$ |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Stati limite di esercizio (SLE) | Stato limite di immediata operatività (SLO)    | 81%                                 | 30  |
|                                 | Stato limite di danno (SLD)                    | 63%                                 | 50  |
| Stati limite ultimi (SLU)       | Salvaguardia della vita umana (SLV)            | 10%                                 | 475   |
|                                 | Stato limite di prevenzione del collasso (SLC) | 5%                                  | 975   |

*Tabella 10: Periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto per i diversi stati limite ( $V_r = 50$  anni).*

| Stato limite di riferimento     |  | Probabilità di superamento $P_{VR}$ | Periodo di ritorno dell'azione sismica $T_R$ per $V_r=75$ |
|---------------------------------|--|-------------------------------------|---|
| Stati limite di esercizio (SLE) | Stato limite di immediata operatività (SLO)    | 81%                                 | 45  |
|                                 | Stato limite di danno (SLD)                    | 63%                                 | 75  |
| Stati limite ultimi (SLU)       | Salvaguardia della vita umana (SLV)            | 10%                                 | 712   |
|                                 | Stato limite di prevenzione del collasso (SLC) | 5%                                  | 1462  |

*Tabella 11: Periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto per i diversi stati limite ( $V_r = 75$  anni).*

Con riferimento al D.M. Infrastrutture 17 gennaio 2018, sono stati determinati i parametri sismici di progetto mediante GeoSTRU.

### 7.5.1 Caratteristiche sismiche del sito

Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ , necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 (come previsto dalle NTC 2018 cfr. par. 3.2).

Sulla base della localizzazione geografica del sito di progetto vengono definiti, quindi, i parametri di riferimento del moto sismico in superficie, successivamente correlati con gli stati limite e la vita nominale dell'opera, al fine di definire gli obiettivi da raggiungere in termini di sicurezza e prestazioni delle opere o di parti di esse.

| ID Sito                  | SL  | T <sub>R</sub> (anni) | a <sub>g</sub> (g) | F <sub>o</sub> (-) | T <sub>c</sub> * (s) |
|--------------------------|-----|-----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| <b>MASW 1 – HVSR 1</b>   | SLO | 30                    | 0.016              | 2.584              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.020              | 2.561              | 0.166                |
|                          | SLV | 475                   | 0.041              | 2.641              | 0.282                |
|                          | SLC | 975                   | 0.050              | 2.685              | 0.302                |
| <b>MASW 2 – HVSR 2</b>   | SLO | 30                    | 0.016              | 2.585              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.020              | 2.561              | 0.166                |
|                          | SLV | 475                   | 0.041              | 2.640              | 0.282                |
|                          | SLC | 975                   | 0.050              | 2.688              | 0.301                |
| <b>MASW 3 – HVSR 3</b>   | SLO | 30                    | 0.016              | 2.583              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.020              | 2.558              | 0.165                |
|                          | SLV | 475                   | 0.042              | 2.638              | 0.282                |
|                          | SLC | 975                   | 0.051              | 2.694              | 0.300                |
| <b>MASW 4 – HVSR 4</b>   | SLO | 30                    | 0.016              | 2.582              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.020              | 2.557              | 0.165                |
|                          | SLV | 475                   | 0.042              | 2.638              | 0.282                |
|                          | SLC | 975                   | 0.051              | 2.696              | 0.300                |
| <b>MASW 5 – HVSR 5</b>   | SLO | 30                    | 0.017              | 2.580              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.021              | 2.553              | 0.168                |
|                          | SLV | 475                   | 0.043              | 2.640              | 0.281                |
|                          | SLC | 975                   | 0.052              | 2.698              | 0.299                |
| <b>MASW 6 – HVSR 6</b>   | SLO | 30                    | 0.017              | 2.578              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.021              | 2.552              | 0.175                |
|                          | SLV | 475                   | 0.044              | 2.644              | 0.280                |
|                          | SLC | 975                   | 0.053              | 2.692              | 0.299                |
| <b>MASW 7 – HVSR 7</b>   | SLO | 30                    | 0.017              | 2.577              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.022              | 2.551              | 0.183                |
|                          | SLV | 475                   | 0.045              | 2.650              | 0.278                |
|                          | SLC | 975                   | 0.055              | 2.684              | 0.299                |
| <b>MASW 8 – HVSR 8</b>   | SLO | 30                    | 0.018              | 2.578              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.022              | 2.554              | 0.185                |
|                          | SLV | 475                   | 0.047              | 2.645              | 0.277                |
|                          | SLC | 975                   | 0.057              | 2.679              | 0.298                |
| <b>MASW 9 – HVSR 9</b>   | SLO | 30                    | 0.018              | 2.578              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.023              | 2.558              | 0.185                |
|                          | SLV | 475                   | 0.048              | 2.640              | 0.277                |
|                          | SLC | 975                   | 0.058              | 2.675              | 0.298                |
| <b>MASW 10 – HVSR 10</b> | SLO | 30                    | 0.018              | 2.580              | 0.158                |
|                          | SLD | 50                    | 0.023              | 2.564              | 0.184                |
|                          | SLV | 475                   | 0.048              | 2.640              | 0.277                |
|                          | SLC | 975                   | 0.058              | 2.675              | 0.298                |
| <b>MASW 11 – HVSR 11</b> | SLO | 30                    | 0.018              | 2.579              | 0.158                |

|                                   |     |      |       |       |       |
|-----------------------------------|-----|------|-------|-------|-------|
|                                   | SLD | 50   | 0.023 | 2.561 | 0.185 |
|                                   | SLV | 475  | 0.049 | 2.636 | 0.277 |
|                                   | SLC | 975  | 0.060 | 2.670 | 0.297 |
| MASW 12 – HVSr 12                 | SLO | 30   | 0.019 | 2.576 | 0.158 |
|                                   | SLD | 50   | 0.024 | 2.546 | 0.186 |
|                                   | SLV | 475  | 0.052 | 2.629 | 0.277 |
| MASW 13 – HVSr 13                 | SLC | 975  | 0.063 | 2.655 | 0.297 |
|                                   | SLO | 30   | 0.020 | 2.579 | 0.160 |
|                                   | SLD | 50   | 0.025 | 2.547 | 0.188 |
| MASW 14 – HVSr 14                 | SLV | 475  | 0.054 | 2.625 | 0.278 |
|                                   | SLC | 975  | 0.067 | 2.639 | 0.296 |
|                                   | SLO | 30   | 0.019 | 2.587 | 0.158 |
| MASW 15 – HVSr 15<br>(Via Gaggio) | SLD | 50   | 0.025 | 2.561 | 0.186 |
|                                   | SLV | 475  | 0.053 | 2.632 | 0.278 |
|                                   | SLC | 975  | 0.065 | 2.649 | 0.298 |
| MASW 16 – HVSr 16<br>(Via Gaggio) | SLO | 45   | 0.023 | 2.568 | 0.180 |
|                                   | SLD | 75   | 0.029 | 2.581 | 0.201 |
|                                   | SLV | 712  | 0.059 | 2.645 | 0.289 |
| MASW 17 – HVSr 17                 | SLC | 1462 | 0.072 | 2.683 | 0.303 |
|                                   | SLO | 45   | 0.023 | 2.567 | 0.180 |
|                                   | SLD | 75   | 0.029 | 2.581 | 0.201 |
| MASW 18 – HVSr 18                 | SLV | 712  | 0.059 | 2.644 | 0.289 |
|                                   | SLC | 1462 | 0.073 | 2.682 | 0.303 |
|                                   | SLO | 30   | 0.020 | 2.592 | 0.159 |
| MASW 19 – HVSr 19                 | SLD | 50   | 0.025 | 2.555 | 0.188 |
|                                   | SLV | 475  | 0.054 | 2.633 | 0.279 |
|                                   | SLC | 975  | 0.067 | 2.644 | 0.297 |
| MASW 20 – HVSr 20                 | SLO | 30   | 0.020 | 2.593 | 0.159 |
|                                   | SLD | 50   | 0.025 | 2.553 | 0.188 |
|                                   | SLV | 475  | 0.054 | 2.633 | 0.279 |
| MASW 21 – HVSr 21                 | SLC | 975  | 0.067 | 2.642 | 0.297 |

*Tabella 12: Parametri di riferimento del moto sismico in superficie per i differenti stati limite definiti dalla normativa.*

## 7.6 AMPLIFICAZIONE DI SITO

Le NTC2018 definiscono il fattore S di amplificazione di sito come funzione sia della categoria di sottosuolo ( $S_S$ ), che dell'andamento della superficie topografica (attraverso il coefficiente  $S_T$ ):

$$S = S_S \cdot S_T$$

### 7.6.1 Condizioni Topografiche

Per quanto concerne le caratteristiche della superficie topografica, essendo tutte le aree in oggetto localizzate in ambito di pianura e non essendovi particolari emergenze topografiche che possano dar luogo ad effetti di

amplificazione sismica locale, le morfologie possono essere ricondotte ad una delle configurazioni superficiali semplici previste nel D.M. 17/01/2018 in Tabella 3.2.III.

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

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

In particolare, il sito in oggetto può essere classificato di categoria **T1**, “Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ ”, caratterizzata da un coefficiente di amplificazione topografica  $S_T = 1$ .

### 7.6.2 Categorie di Sottosuolo

La normativa, al capitolo 3.2.2, cita:

*“Ai fini della definizione dell’azione sismica di progetto, l’effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella **Tab. 3.2.II**, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ .”*

$V_{s,eq}$  è la velocità media di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{s,Eq} = \frac{h}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}}$$

$h_i$  = spessore (in m);

$V_i$  = velocità delle onde di taglio dello strato “i-esimo”, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori;

N = numero di strati.

**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 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.</i>   |
| B         | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>  |
| C         | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>   |
| D         | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i> |
| E         | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>  |

Come riportato al par. 5.2, i terreni dell'area di studio appartengono alle categorie di sottosuolo **B** e **C**. Tuttavia, i Comuni interessati dal presente progetto ricadono, secondo la riclassificazione sismica operata dalla Regione Lombardia con D.G.R. 11/07/2014 n. X/2129, in zona sismica 3 e 4; inoltre, la loro analisi sismica di 1° livello, effettuata dallo studio geologico a supporto del PGT comunale, ha permesso di individuare, per le aree immediatamente circostanti il settore d'imposta della struttura in progetto, la situazione corrispondente agli scenari **Z4a** "Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali e/o detritici", **Z4b** "Zona pedemontana di falda di detrito e conide alluvionale" e **Z4c** "Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi" in grado di determinare gli effetti sismici locali per amplificazioni litologiche. Per tale scenario la normativa regionale entrata in vigore con l'approvazione della D.G.R. n. X/5001 del 30/03/2016, richiede l'applicazione del 2° livello di approfondimento.

Inoltre, la linea ferroviaria di progetto ricade nello scenario **Z2** "Zone con terreni di fondazione particolarmente scadenti (riporti poco addensati, depositi altamente compressibili, ecc) e zone con depositi granulari". Tale scenario richiede l'applicazione del 3° livello di approfondimento in quanto le litologie presenti risultano in grado di determinare effetti sismici locali per cedimenti e/o liquefazione.

La DGR n. IX/2616 del 30 novembre 2011, più precisamente al punto 2.3.2 *Effetti di cedimenti e/o liquefazioni* dell'Allegato 5, richiede la valutazione quantitativa delle aree soggette a fenomeni di cedimenti e liquefazioni utilizzando procedure note in letteratura.

In Allegato 5 alla DGR n. IX/2616 è riportata la metodologia per la valutazione dell'amplificazione sismica locale, in adempimento a quanto previsto dalle NTC2008 (e quindi, dalle NTC2018), dalla DGR n. 14964 del 7 novembre 2003 e dal DDUO n. 19904 del 21 novembre 2003.

In particolare, per il caso in esame, risulta obbligatorio il Livello 2 di approfondimento, ossia la caratterizzazione semi-quantitativa degli effetti di amplificazione attesi in termini di valore di Fattore di Amplificazione (Fa). Se i valori ottenuti sono superiori ai valori di soglia di cui allo studio pilota del Politecnico di Milano, allegato alla DGR n. IX/2616 si dovrà procedere alle indagini ed agli approfondimenti di 3° livello o, in alternativa, utilizzare lo spettro di norma caratteristico della categoria di suolo superiore (ad esempio, anziché lo spettro della categoria di suolo C si utilizzerebbe quello relativo alla categoria di suolo D).

Per la definizione del Fattore di Amplificazione (Fa), la normativa regionale propone una serie di schede di valutazione che correlano tale fattore con il periodo proprio del sito T, calcolato utilizzando la seguente equazione:

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

dove  $h_i$  e  $V_{s_i}$  sono lo spessore e la velocità dello strato  $i$ -esimo del profilo geofisico.

La procedura semplificata proposta prevede di ricostruire l'andamento delle Vs con la profondità sino a valori pari o superiori a 800 m/s. In mancanza del raggiungimento del bedrock con le indagini sismiche dirette, è necessario applicare un opportuno gradiente di Vs con la profondità, tale da raggiungere il valore di 800 m/s, sulla base dei risultati delle indagini supportati da informazioni litostratigrafiche sito-specifiche.

| Comune              | intervallo [s] | B   | C   | D   | E   |
|---------------------|----------------|-----|-----|-----|-----|
| COMO                | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| CASNATE CON BERNATE | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| SENNA COMASCO       | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| CAPIAGO INTIMIANO   | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| CANTU'              | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| ALZATE BRIANZA      | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| ANZANO DEL PARCO    | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| MONGUZZO            | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| MERONE              | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| ROGENO              | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|                     | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| MOLTENO             | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |

| Comune     | intervallo [s] | B   | C   | D   | E   |
|------------|----------------|-----|-----|-----|-----|
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| OGGIONO    | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.0 |
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| GALBIATE   | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| VALMADRERA | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| MALGRATE   | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |
| LECCO      | 0.1-0.5        | 1.4 | 1.9 | 2.2 | 2.0 |
|            | 0.5-1.5        | 1.7 | 2.4 | 4.2 | 3.1 |

*Tabella 13: Soglie definite dalla regione Lombardia per i fattori di amplificazione dei comuni interessati dal progetto.*

Per ciò che concerne gli effetti litologici, è stata selezionata la scheda litologica sabbiosa. Applicando le formule proposte per la scheda litologia selezionata, si calcola il fattore di amplificazione,  $F_a$ , per i due intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s. Per la scelta della curva di fattore di amplificazione  $F_a$  da utilizzarsi, si deve fare riferimento a  $V_s$  e spessore del primo strato, determinato a seguito della consultazione sia delle indagini geofisiche MASW e HVSR, sia dalla consultazione delle stratigrafie dei sondaggi geognostici e dalle risultanze delle prove SPT eseguite.

| Comune              | ID indagine | CAT. SUOLO | Periodo T | Curva | intervallo [s] | Fa calcolato | Fa Soglia | ESITO          |
|---------------------|-------------|------------|-----------|-------|----------------|--------------|-----------|----------------|
| CASNATE CON BERNATE | MASW-HVSR 1 | C          | 0.677     | 3     | 0.1-0.5        | 0.87         | 1.8 (C)   | VERIFICATO     |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.99         | 2.4 (C)   |                |
| COMO                | MASW-HVSR 2 | C          | 0.446     | 2     | 0.1-0.5        | 1.55         | 1.9 (C)   | VERIFICATO     |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.76         | 2.4 (C)   |                |
| SENNA COMASCO       | MASW-HVSR 3 | B          | 0.164     | 1     | 0.1-0.5        | 1.71         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.13         | 1.7 (B)   |                |
| CAPIAGO INTIMIANO   | MASW-HVSR 4 | B          | 0.211     | 1     | 0.1-0.5        | 1,86         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,22         | 1.7 (B)   |                |
| CANTU'              | MASW-HVSR 5 | B          | 0.398     | 2     | 0.1-0.5        | 1.64         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.64         | 1.7 (B)   |                |
|                     | MASW-HVSR 6 | B          | 0,381     | 2     | 0.1-0.5        | 1.66         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.60         | 1.7 (B)   |                |
| ALZATE BRIANZA      | MASW-HVSR 7 | B          | 0,273     | 2     | 0.1-0.5        | 1.68         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.36         | 1.7 (B)   |                |
| ANZANO DEL PARCO    | MASW-HVSR 8 | C          | 0.285     | 2     | 0.1-0.5        | 1.69         | 1.8 (C)   | VERIFICATO     |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.39         | 2.4 (C)   |                |
| MONGUZZO            | MASW-HVSR 9 | B          | 0,222     | 2     | 0.1-0.5        | 1,62         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|                     |             |            |           |       | 0.5-1.5        | 1.25         | 1.7 (B)   |                |

| Comune     | ID indagine  | CAT. SUOLO | Periodo T | Curva | intervallo [s] | Fa calcolato | Fa Soglia | ESITO          |
|------------|--------------|------------|-----------|-------|----------------|--------------|-----------|----------------|
| MERONE     | MASW-HVSR 10 | B          | 0,162     | 2     | 0.1-0.5        | 1,50         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,13         | 1.7 (B)   |                |
| ROGENO     | MASW-HVSR 11 | B          | 0,293     | 2     | 0.1-0.5        | 1,69         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,40         | 1.7 (B)   |                |
| MOLTENO    | MASW-HVSR 12 | C          | 0,853     | N.A.  | 0.1-0.5        | 1,00         | 1.8 (C)   | VERIFICATO     |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,00         | 2.4 (C)   |                |
| OGGIONO    | MASW-HVSR 13 | B          | 0,302     | 2     | 0.1-0.5        | 1,69         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,43         | 1.7 (B)   |                |
| GALBIATE   | MASW-HVSR 14 | B          | 0,193     | 3     | 0.1-0.5        | 1,42         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,19         | 1.7 (B)   |                |
| VALMADRERA | MASW-HVSR 15 | C          | 0,469     | 3     | 0.1-0.5        | 1,11         | 1.9 (C)   | VERIFICATO     |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,78         | 2.4 (C)   |                |
| MALGRATE   | MASW-HVSR 16 | C          | 0,669     | 2     | 0.1-0.5        | 1,18         | 1.9 (C)   | VERIFICATO     |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,99         | 2.4 (C)   |                |
| GALBIATE   | MASW-HVSR 17 | C          | 0,419     | 3     | 0.1-0.5        | 1,16         | 1.9 (C)   | VERIFICATO     |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,68         | 2.4 (C)   |                |
| LECCO      | MASW-HVSR 18 | B          | 0,541     | 2     | 0.1-0.5        | 1,37         | 1.4 (B)   | NON VERIFICATO |
|            |              |            |           |       | 0.5-1.5        | 1,90         | 1.7 (B)   |                |

*Tabella 14: Esiti delle analisi sismiche di 2° livello con metodologia semplificata.*

Sulla base del profilo di riferimento di Vs definito sulla base dei dati delle prove di tipo MASW-HVSR eseguite in corrispondenza del tracciato di progetto e applicando le formule di cui alla scheda di valutazione suddetta, per il periodo proprio di sito T calcolato, si ottengono i fattori di amplificazione  $F_a$ , per i due intervalli di periodo 0.1-0.5 s e 0.5-1.5 s, riportati nella Tabella precedente. Tali fattori hanno verificato la Categoria di suolo C per le opere di progetto, mentre laddove le indagini geofisiche avevano determinato una categoria B, la presente verifica ha dato esito negativo, pertanto, dovrà essere maggiormente attenzionata considerando una categoria di sottosuolo maggiore (anziché lo spettro della categoria di suolo B si utilizzerebbe quello relativo alla categoria di suolo C).

Individuata la categoria di sottosuolo (C), il coefficiente  $S_s$  si ottiene dalle seguenti espressioni (Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

| Categoria sottosuolo | $S_s$   |
|----------------------|---|
| A                    | 1,00  |
| B                    | $1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$ |

|   |   |
|---|---|
| C | $1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$ |
| D | $0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$ |
| E | $1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$ |

Tabella 15: Tabella delle espressioni per  $S_s$ .

## 7.7 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Sulla base di quanto sopra, i valori dell'azione sismica di progetto  $a_{max} = S \cdot a_g$  per i periodi di ritorno corrispondenti ai diversi stati limite sono riportati nella Tabella a seguire.

| ID Sito           | SL  | $T_R$ (anni) | $a_g$ (g) | $F_0$ (-) | $T_c^*$ (s) | Classe di sito | $S_S$ (-) | Categoria topografica | $S_T$ (-) | S (-) | $a_{max}$ (g) |
|-------------------|-----|--------------|-----------|-----------|-------------|----------------|-----------|-----------------------|-----------|-------|---------------|
| MASW 1 – HVSR 1   | SLV | 475          | 0.041     | 2.641     | 0.282       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.06          |
| MASW 2 – HVSR 2   | SLV | 475          | 0.041     | 2.64      | 0.282       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.06          |
| MASW 3 – HVSR 3   | SLV | 475          | 0.042     | 2.638     | 0.282       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.06          |
| MASW 4 – HVSR 4   | SLV | 475          | 0.042     | 2.638     | 0.282       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.06          |
| MASW 5 – HVSR 5   | SLV | 475          | 0.043     | 2.64      | 0.281       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.06          |
| MASW 6 – HVSR 6   | SLV | 475          | 0.044     | 2.644     | 0.28        | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 7 – HVSR 7   | SLV | 475          | 0.045     | 2.65      | 0.278       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 8 – HVSR 8   | SLV | 475          | 0.047     | 2.645     | 0.277       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 9 – HVSR 9   | SLV | 475          | 0.048     | 2.64      | 0.277       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 10 – HVSR 10 | SLV | 475          | 0.048     | 2.64      | 0.277       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 11 – HVSR 11 | SLV | 475          | 0.049     | 2.636     | 0.277       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.07          |
| MASW 12 – HVSR 12 | SLV | 475          | 0.052     | 2.629     | 0.277       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.08          |
| MASW 13 – HVSR 13 | SLV | 475          | 0.054     | 2.625     | 0.278       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.08          |
| MASW 14 – HVSR 14 | SLV | 475          | 0.053     | 2.632     | 0.278       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.08          |
| MASW 15 – HVSR 15 | SLV | 712          | 0.059     | 2.645     | 0.289       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.09          |
| MASW 16 – HVSR 16 | SLV | 712          | 0.059     | 2.644     | 0.289       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.09          |
| MASW 17 – HVSR 17 | SLV | 475          | 0.054     | 2.633     | 0.279       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.08          |
| MASW 18 – HVSR 18 | SLV | 475          | 0.054     | 2.633     | 0.279       | C              | 1.5       | T1                    | 1         | 1.5   | 0.08          |

Tabella 16: Valori di  $a_g$ , dei coefficienti di sito  $S$  e di accelerazione di progetto  $a_{max}$  per lo stato limite SLV.

## 8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Si riporta, nei paragrafi che seguono, la caratterizzazione geotecnica dei materiali rinvenuti nelle specifiche aree di intervento nei primi 30 m di profondità circa.

### 8.1 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE NON LAPIDEE INDIVIDUATE

#### 8.1.1 Unità R – Riporto

##### 8.1.1.1 Identificazione

Materiale di riporto di diversa natura (terreno antropico o agrario) di colore marrone /grigio.



Figura 5: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S7 – Unità R.



Figura 6: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S17 – Unità R.

Per tale unità non sono state eseguite determinazioni di laboratorio né prove in sito: per tale motivo il peso specifico dell'unità di volume è stato assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ kN/m}^3$

### 8.1.1.2 Parametri di resistenza

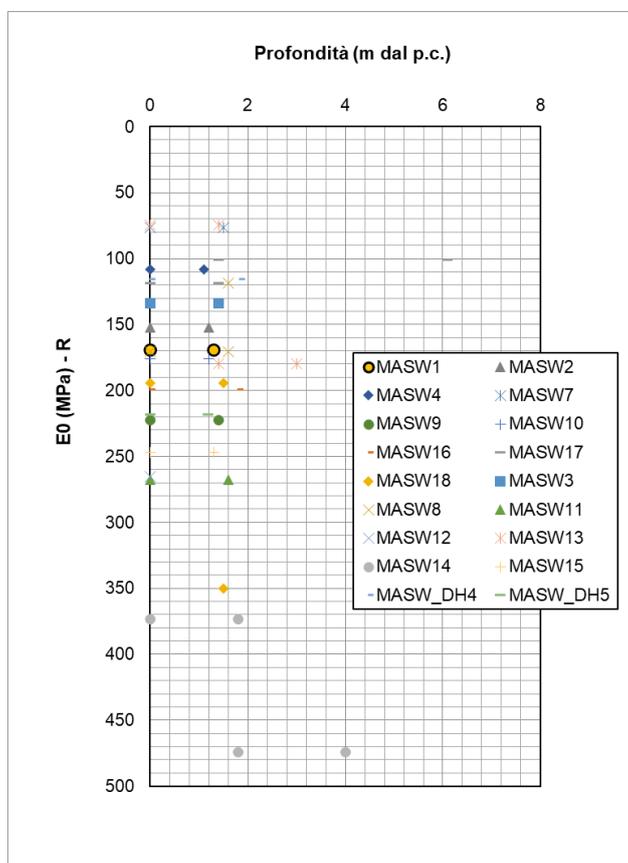
Per tale unità non è sono state condotte né prove in sito né di laboratorio, pertanto, i parametri di resistenza sono stati assegnati prendendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica. Di seguito se ne riportano i valori:

➤  $c' = 0 \text{ kPa}$

➤  $\varphi' = 25^\circ - 30^\circ$

### 8.1.1.3 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati nella Figura che segue. I valori del modulo dinamico  $E_0$  risultano molto dispersi; in generale si assume un valore del modulo dinamico compreso tra circa 80 e 300 MPa.



#### 8.1.1.4 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 5 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è compresa tra  $3.3 \times 10^{-5}$  e  $2.1 \times 10^{-4}$  m/s (media  $1.22 \times 10^{-4}$  m/s).

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S16 IV  | 1.75           | 2.10E-04 | R      |
| S18 IV  | 2.25           | 6.80E-05 | R      |
| S20 IV  | 2.75           | 3.30E-05 | R      |
| S25 GA  | 5.5            | 1.00E-04 | R      |
| S26 IV  | 1.75           | 2.00E-04 | R      |

*Tabella 17: Risultati delle prove Lefranc – Unità R.*

#### 8.1.1.5 Unità R – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità R:

- $\gamma = 19-20 \text{ kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 25^\circ-30^\circ$
- $E_0 = 80-300 \text{ MPa}$

## 8.1.2 Unità P

### 8.1.2.1 Identificazione

Si tratta di depositi fluviali e di conoide appartenenti al Sintema del Po e costituiti prevalentemente da terreni limosi-argillosi e modeste intercalazioni sabbio-limose, classificabili come A4 (HRB–AASHTO) di colore da nocciola a grigio. L'unità affiora in tutto il territorio considerato lungo le aste dei fiumi attualmente attivi e lungo i versanti caratterizzati da instabilità attuale o recente. Depositi lacustri sono presenti presso modestissimi bacini posti a S di Musico (S di Costa Masnaga) e a N di Cremella, a carattere per lo più stagionale, dove la deposizione di questi sedimenti avviene tuttora.



*Figura 8: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S24 – Unità P.*

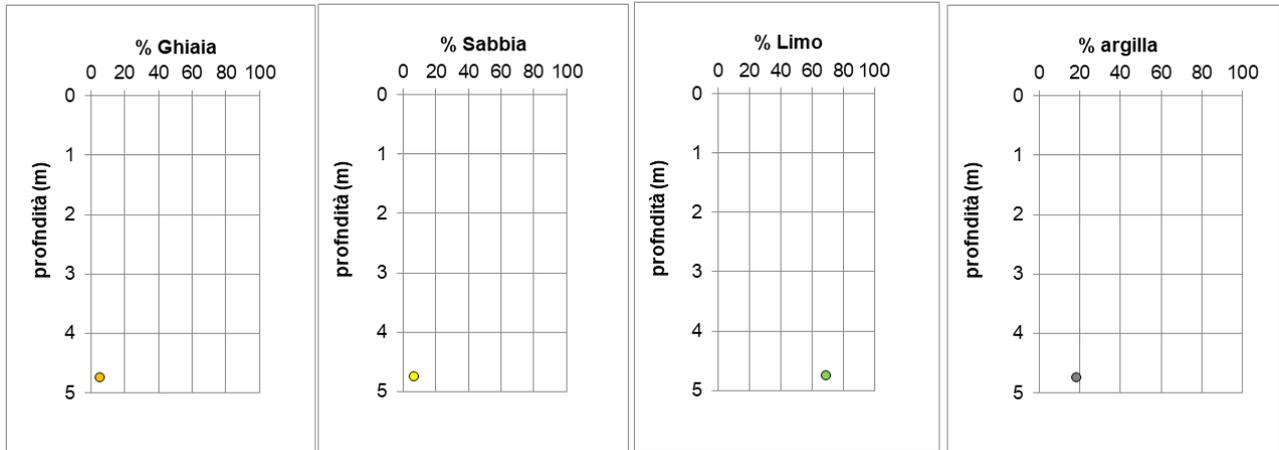
Per l'unità geotecnica in esame è stato prelevato un campione su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S24IV     | CR1      | 4.75            |          | X  | X      | X  |

Dalle analisi granulometriche si ottiene:

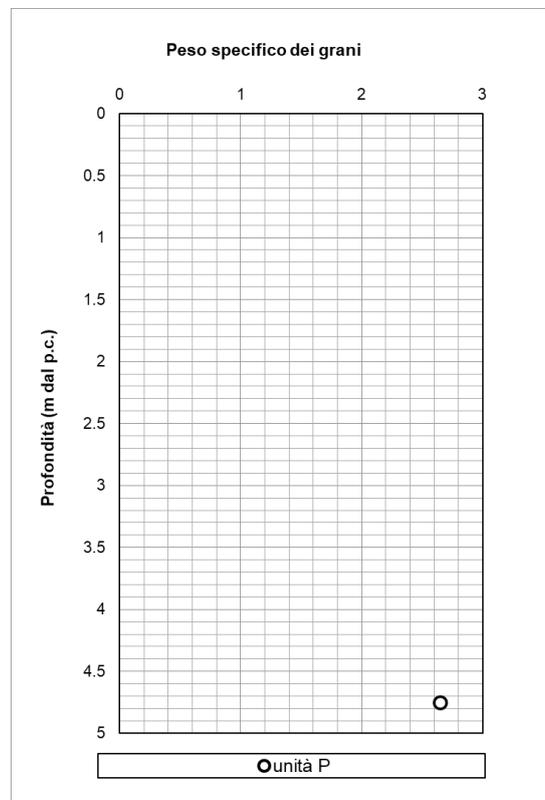
- ghiaia 5.5 %;
- sabbia 6.9 %;
- limo 69.1 %;
- argilla 18.5 %.

Per quanto sopra l'unità **P** è classificabile mediamente come **Limo argilloso debolmente sabbioso e ghiaioso**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:



*Figura 9: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità P.*

Il peso specifico dei grani è risultato pari a 2.65.



*Figura 10: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità P.*

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 18-19 \text{ KN/m}^3$

Il limite liquido è risultato pari a 30.6%, il limite plastico pari a 21.1% e l'indice plastico pari a 9.5%.

In base alla carta di plasticità l'unità P è classificabile come "Argille da medio-bassa plasticità".

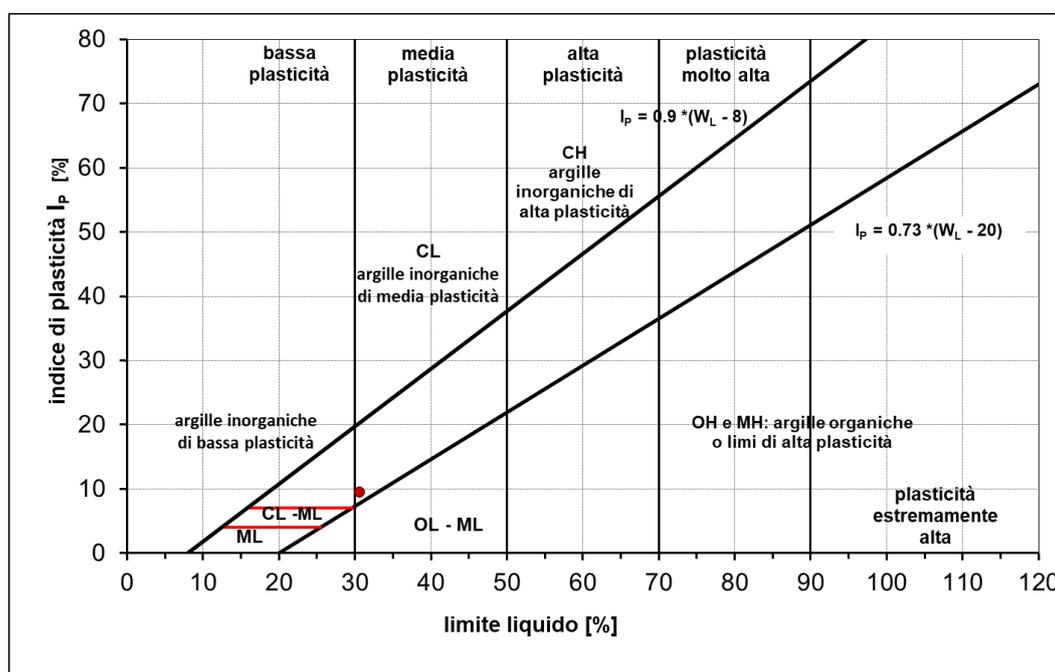


Figura 11: Carta di plasticità di Casagrande – Unità P.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità P non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici, pertanto, le caratteristiche di resistenza sono state stimate facendo riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT e alle prove speditive su carote (Pocket Test). Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

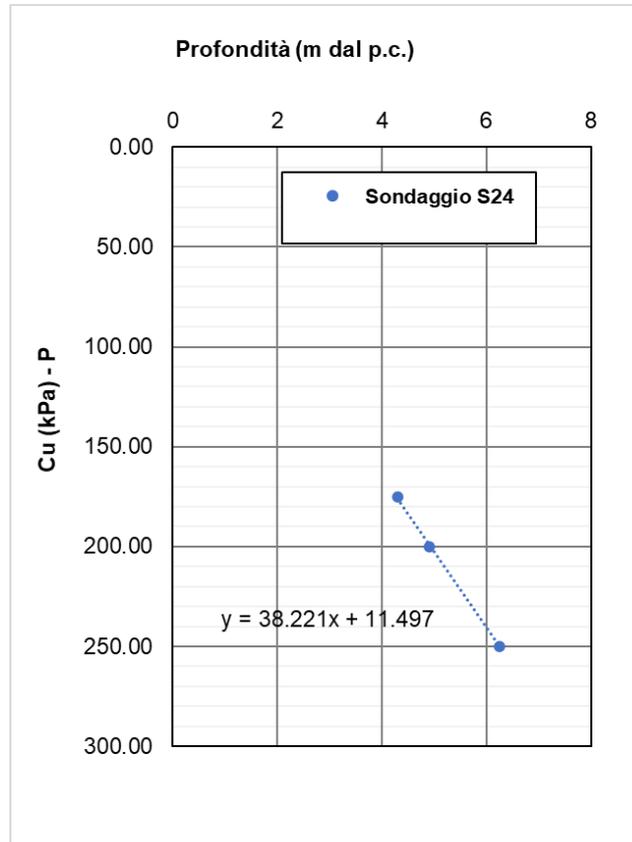


Figura 12: Coesione non drenata da Pocket Test su carote al variare della profondità – Unità P.

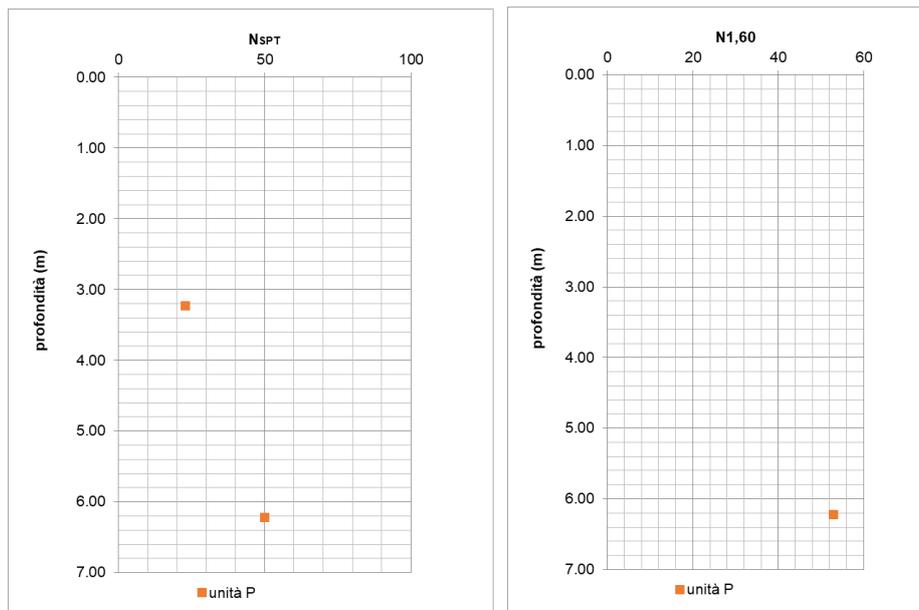
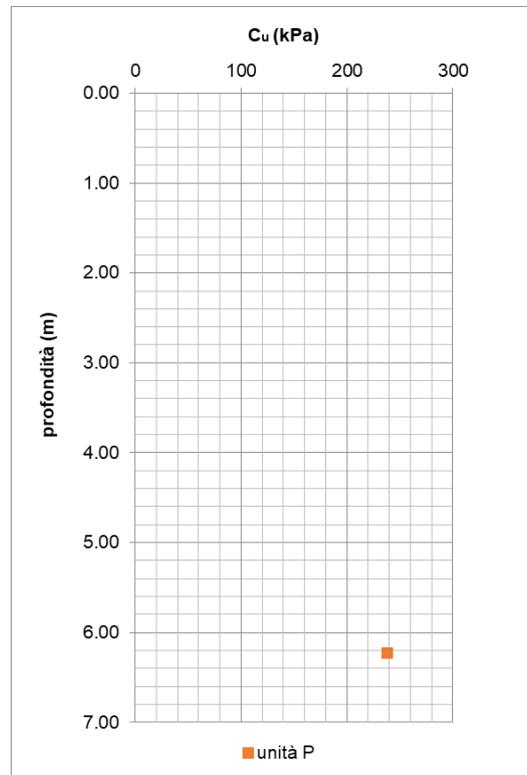


Figura 13: Valori del numero di colpi  $N_{spt}$  e  $N_{1,60}$  al variare della profondità da p.c. – Unità P [le prove “a rifiuto” e quelle non attendibili non sono state considerata nella valutazione della resistenza].



*Figura 14: Coesione non drenata stimata da prove penetrometriche dinamiche SPT mediante la correlazione di Stroud (1974) al variare della profondità.*

In generale, i valori sono rappresentativi di un materiale consistente con una coesione non drenata lineare con la profondità, descritta dalla seguente regressione lineare:

$$c_u = (38z + 11.5) \text{ kPa}$$

### 8.1.2.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati nella Figura che segue. Il valore del modulo dinamico  $E_0$  è pari a 280-350 MPa.

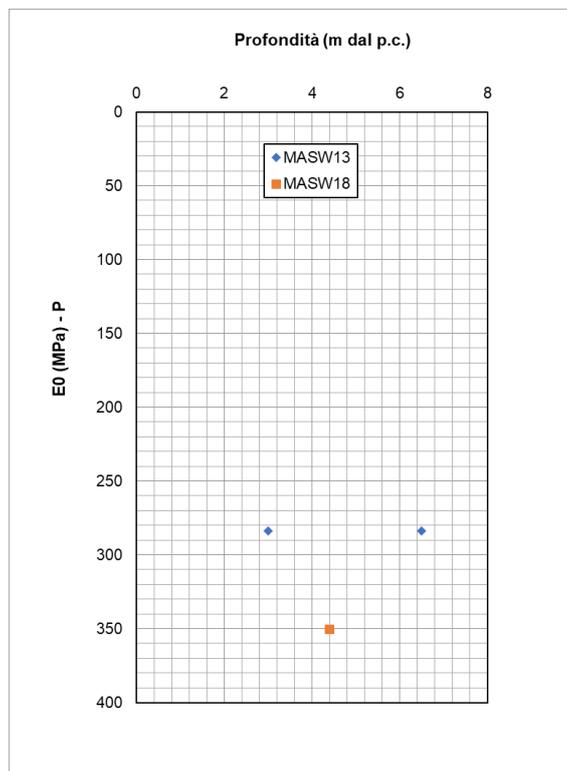


Figura 15: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. – Unità P.

### 8.1.2.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 1 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è pari a  $6.9 \times 10^{-5}$  m/s.

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S32     | 2.75           | 6.90E-05 | P      |

Tabella 18: Risultati delle prove Lefranc – Unità P.

### 8.1.2.4 Unità P – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità P:

- $\gamma=18-19$  kN/m<sup>3</sup>
- $c_u=(38z+11.5)$  kPa
- $E_0= 280-350$  MPa

### 8.1.3 Unità Sp

#### 8.1.3.1 Identificazione

Si tratta di depositi appartenenti al Sintema dello Specola e costituiti da diamicton massivi a supporto di matrice (depositi glaciali) e da ghiaie a supporto di matrice con clasti isorientati e locali intercalazioni sabbiose, ghiaie massive a supporto di matrice (depositi fluvioglaciali). L'alterazione interessa circa l'80% dei clasti, con profilo di alterazione che può raggiungere spessori di 6-8 metri. Sono classificabili come A4 e A2-6(HRB-AASHTO) e presentano un colore da nocciola a marrone.



*Figura 16: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S10 – Unità Sp.*

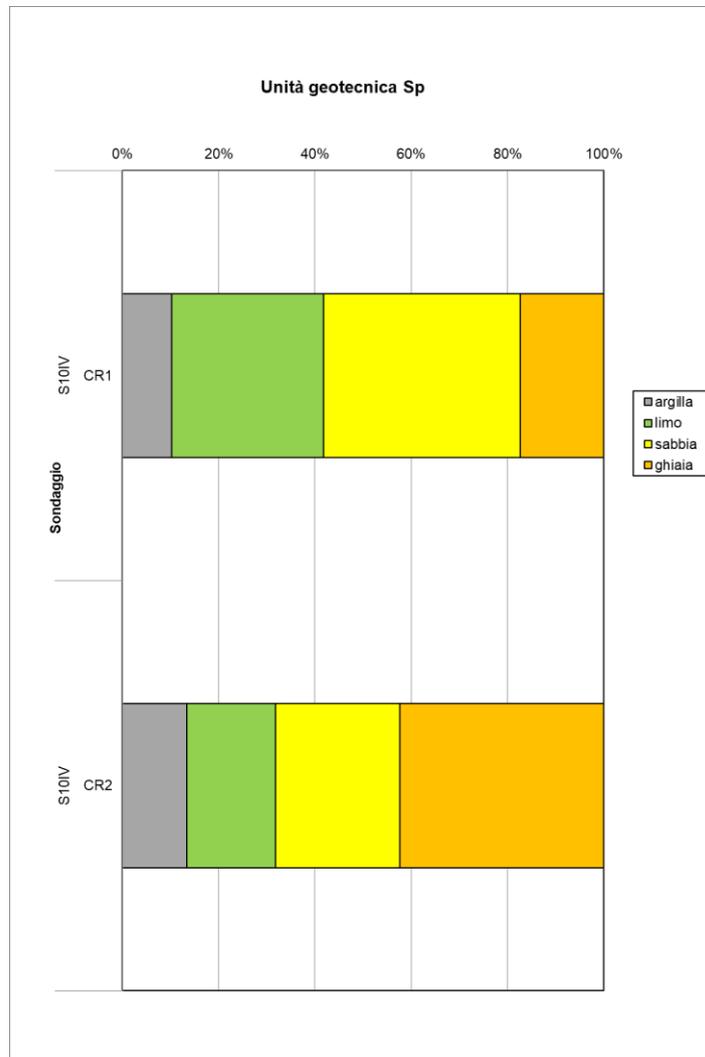
Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati due campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S10V      | CR1      | 8.25            |          | X  |        | X  |
| S10V      | CR2      | 13.75           |          | X  | X      | X  |

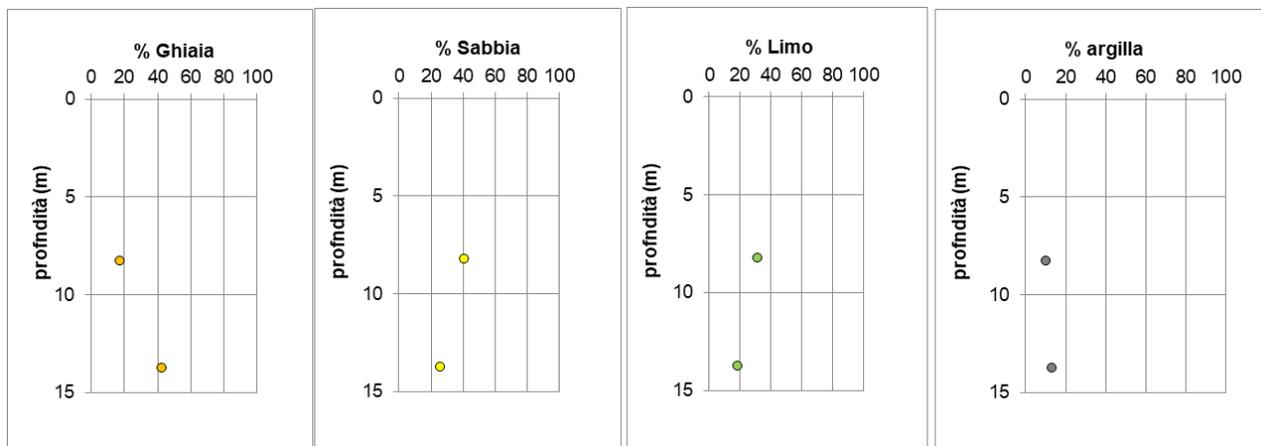
Dalle analisi granulometriche si ottiene:

- ghiaia compresa fra 17.3 e 42.4% (media 29.9%);
- sabbia compresa fra 25.8 e 40.9% (media 33.4%);
- limo compreso fra 18.4 e 31.6 % (media 25%);
- argilla compresa fra 10.2 e 13.4 % (media 11.8%).

Per quanto sopra l'unità **Sp** è classificabile mediamente come **Sabbia con Ghiaia e Limo argillosa**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:



*Figura 17: Analisi granulometrica per ciascuno dei campioni lavorati – Unità Sp.*



*Figura 18: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità Sp.*

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.63 e 2.65 (media 2.64).

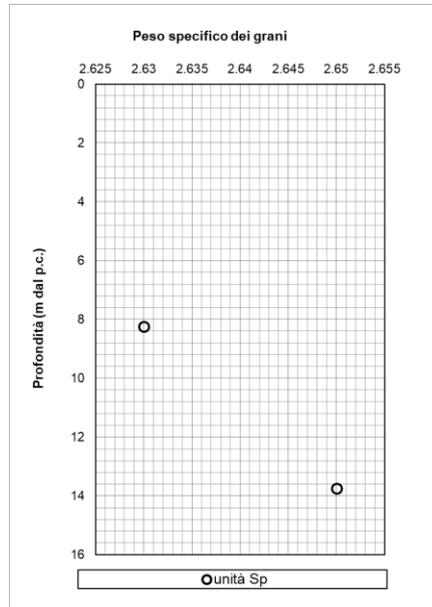


Figura 19: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità Sp.

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ KN/m}^3$

Inoltre, sul campione S10/CR2 sono stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato pari a 26.5%, il limite plastico pari a 16.1% e l'indice plastico pari a 10.4%.

In base alla carta di plasticità l'unità Sp è classificabile come "Argille con bassa plasticità".

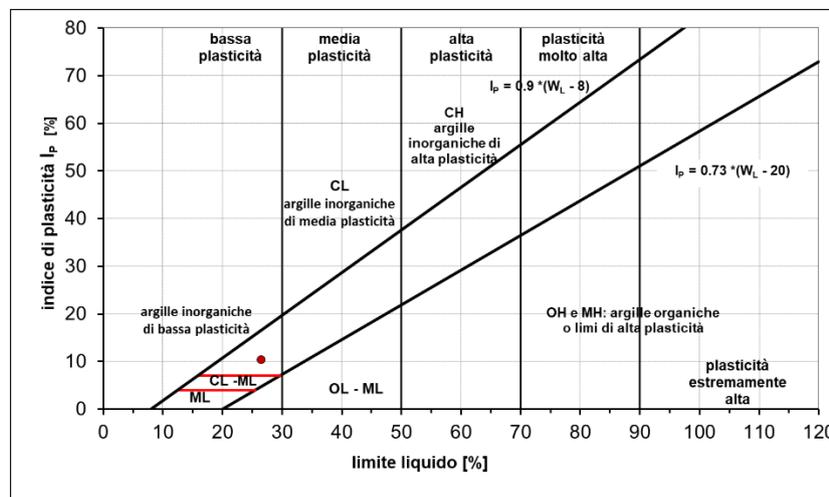


Figura 20: Carta di plasticità di Casagrande – Unità Sp.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità Sp non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici; inoltre, tutte le prove penetrometriche SPT relative all'unità hanno restituito valori a rifiuto o non affidabili (vedi figura sottostante). Per tale ragione, i parametri efficaci sono stati assegnati prendendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica. Di seguito se ne riportano i valori:

- $c' = 0$  kPa
- $\varphi' = 28^\circ - 30^\circ$

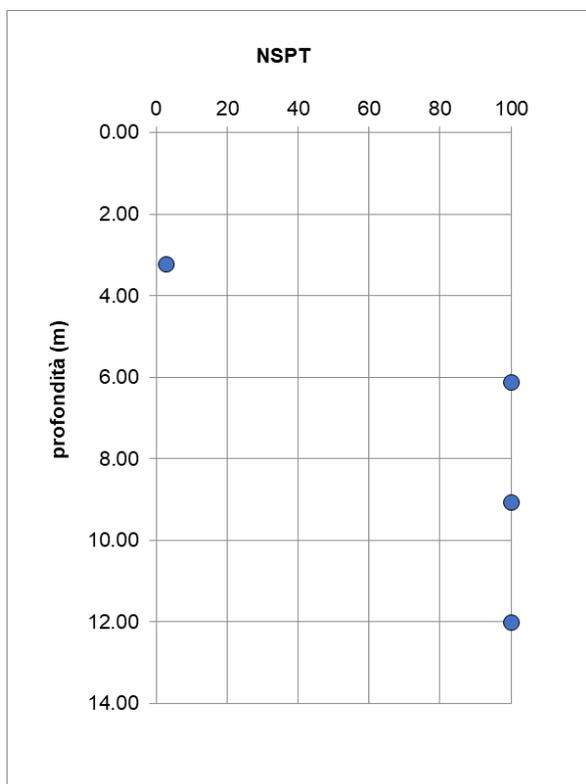


Figura 21: Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  al variare della profondità da p.c. – Unità Sp.

### 8.1.3.2 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 1 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è pari a  $1.4 \times 10^{-5}$ .

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S10 IV  | 7.25           | 1.40E-05 | Sp     |

Tabella 19: Risultati delle prove Lefranc – Unità Sp.

### **8.1.3.3 Unità Sp – Sintesi parametri geotecnici di progetto**

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità Sp:

- $\gamma = 19-20 \text{ kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 28^\circ-30^\circ$

## 8.1.4 Unità B

### 8.1.4.1 Identificazione

Si tratta di depositi appartenenti al Supersistema di Besnate (unità di Cadorago) e costituiti da depositi glaciali e fluvioglaciali. Il profilo di alterazione non è molto evoluto con spessori di 3-4 metri; l'alterazione è variabile e interessa tra il 30% e il 50% dei clasti. Sono classificabili come A1-b e A2-4 (HRB-AASHTO) e di colore da nocciola a grigio.



Figura 22: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S13 – Unità B.

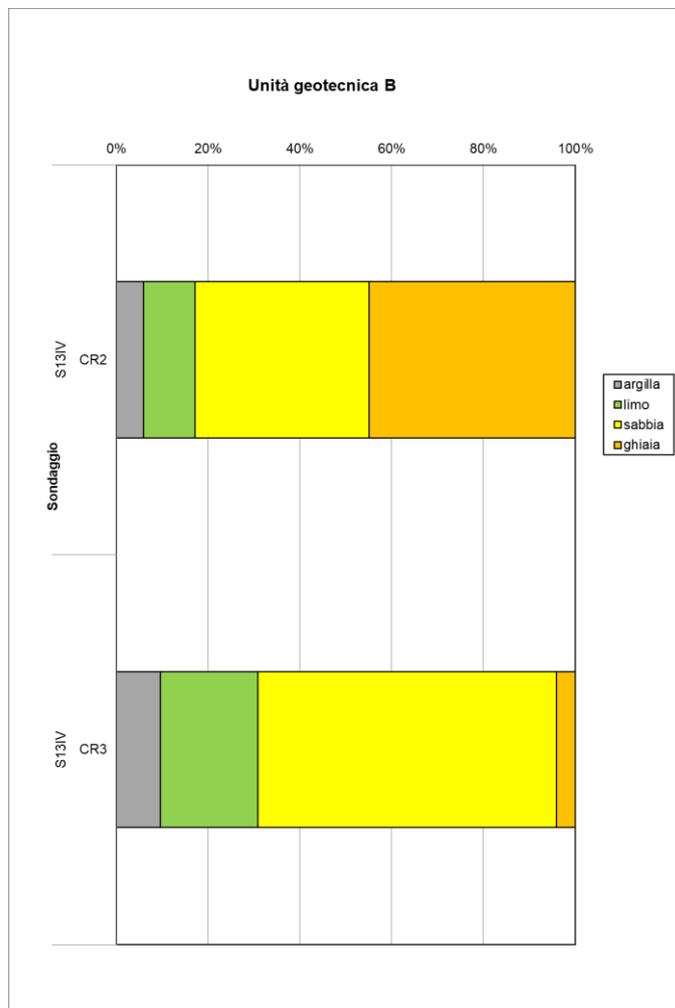
Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati due campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S13IV     | CR2      | 9.75            |          | X  | X      | X  |
| S13IV     | CR3      | 30.25           |          | X  | X      | X  |

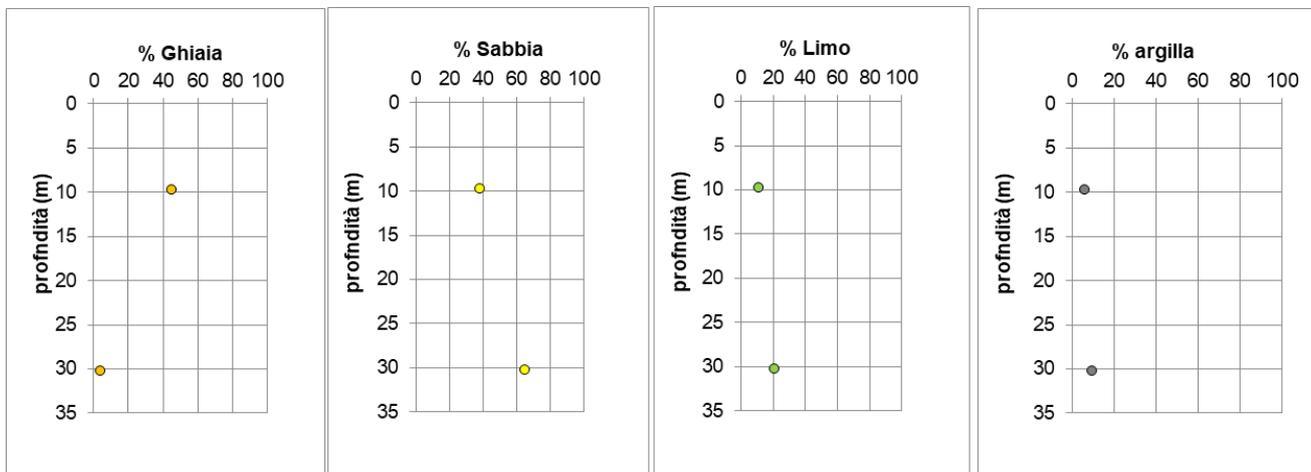
Dalle analisi granulometriche si ottiene:

- ghiaia compresa fra 4.0 e 44.9% (media 24.5%);
- sabbia compresa fra 38.0 e 65.2% (media 51.6%);
- limo compreso fra 11.2 e 21.2 % (media 16.2%);
- argilla compresa fra 5.9 e 9.6 % (media 7.8%).

Per quanto sopra l'unità B è classificabile mediamente come **Sabbia ghiaiosa e limosa deb. argillosa**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:

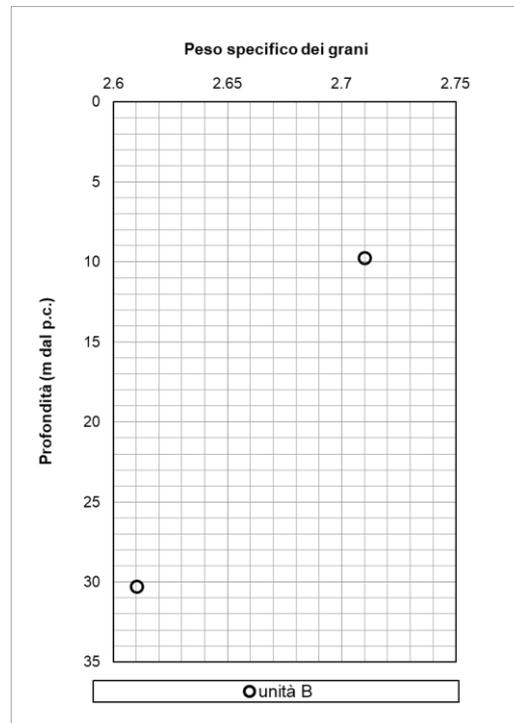


**Figura 23: Analisi granulometrica per ciascuno dei campioni lavorati – Unità B.**



**Figura 24: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità B.**

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.61 e 2.71 (media 2.66).



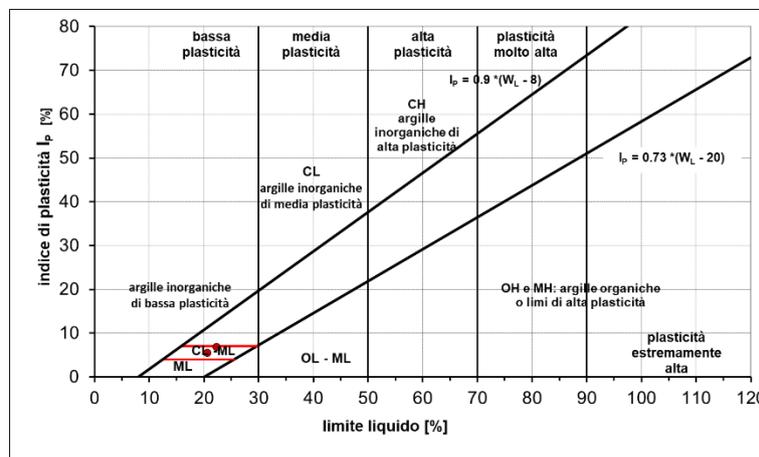
**Figura 25: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità B.**

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ KN/m}^3$

Inoltre, su entrambi i campioni sono stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato compreso tra 20.6 e 22.3% (media 21.45%), il limite plastico tra 15.1 e 15.5% (media 15.3%), l'indice plastico tra 5.5 e 6.8% (media 6.15%).

In base alla carta di plasticità l'unità B è classificabile come "Argille con bassa plasticità".



**Figura 26: Carta di plasticità di Casagrande – Unità B.**

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità B non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici; inoltre, tutte le prove penetrometriche SPT relative hanno restituito valori a rifiuto (vedi figura sottostante). Per tale ragione, i parametri efficaci sono stati assegnati prendendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica. Di seguito se ne riportano i valori:

- $c' = 0$  kPa
- $\varphi' = 30^\circ - 35^\circ$

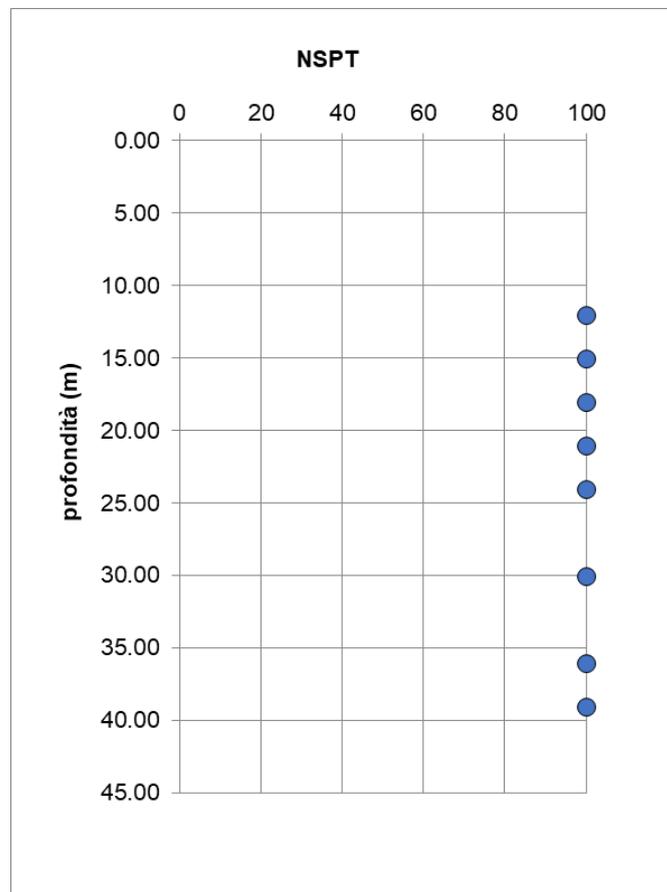


Figura 27: Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  al variare della profondità da p.c. – Unità B.

#### 8.1.4.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati di seguito. Come mostrato nella Figura sottostante, il modulo dinamico  $E_0$  aumenta linearmente con la profondità; mediante una regressione lineare, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E = [117(z - 10m) + 750] \text{ MPa}$$

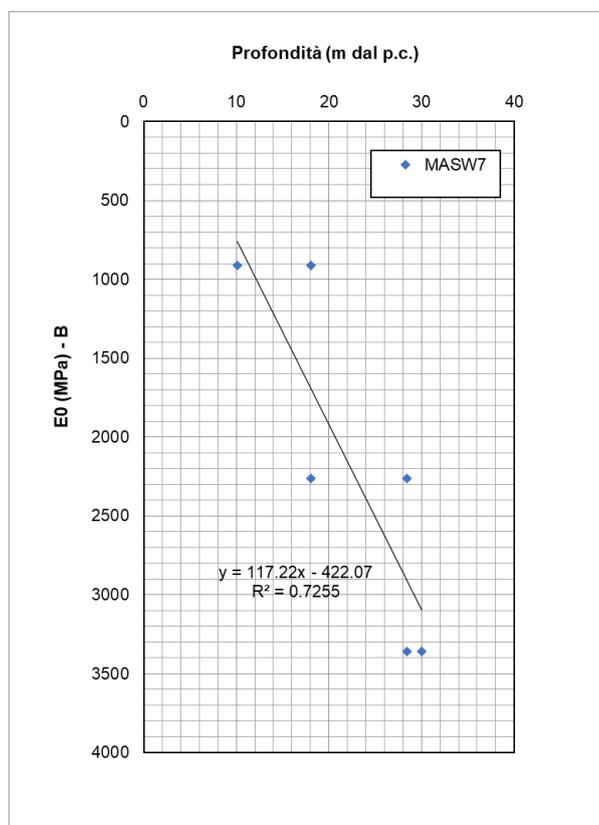


Figura 28: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. – Unità B.

#### 8.1.4.3 Unità B – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità B:

- $\gamma = 19\text{-}20\text{kN/m}^3$
- $c' = 0\text{kPa}$
- $\varphi' = 30^\circ\text{-}35^\circ$
- $E_0 = [117(z-10m) + 750] \text{ MPa}$

## 8.1.5 Unità CF

### 8.1.5.1 Identificazione

Si tratta di depositi appartenenti al Sintema di Cascina Fontana (Supersintema del Bozzente) e costituiti diamicton massivi a supporto di matrice (depositi glaciali) e ghiaie massive o grossolanamente stratificate a supporto di matrice e occasionalmente clastico, con intercalazioni sabbiose (depositi fluvioglaciali). Marcata alterazione che interessa più del 90% dei clasti per tutto il profilo dell'unità. Sono classificabili come A4 e A7-6 (HRB-AASHTO) e presentano un colore marrone.



Figura 29: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S11 – Unità CF.

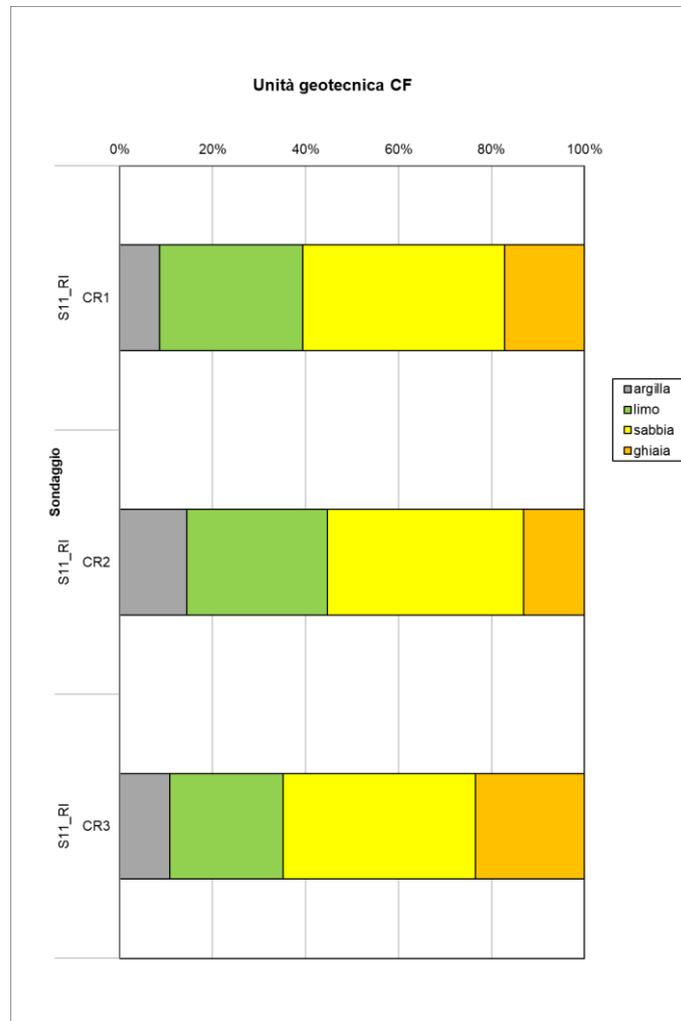
Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati tre campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S11_RI    | CR1      | 3.75            |          | X  |        | X  |
| S11_RI    | CR2      | 12.75           |          | X  | X      | X  |
| S11_RI    | CR3      | 21.25           |          | X  | X      | X  |

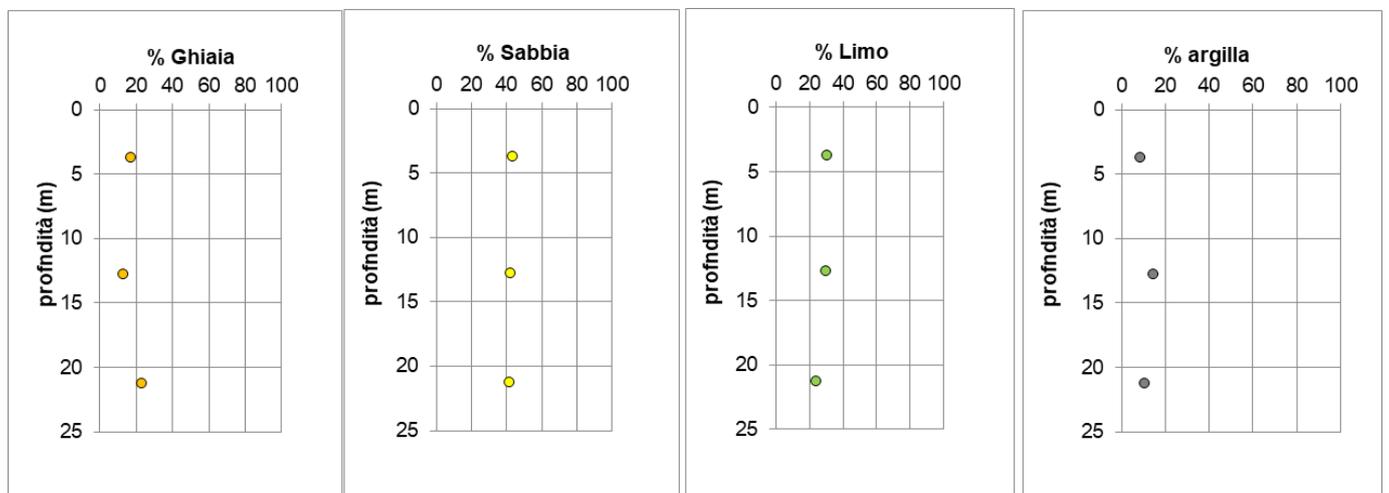
Dalle analisi granulometriche si ottiene:

- ghiaia compresa fra 13.1 e 23.4% (media 17.9%);
- sabbia compresa fra 41.4 e 43.4% (media 42.3%);
- limo compreso fra 24.3 e 30.8 % (media 28.4%);
- argilla compresa fra 8.6 e 14.5 % (media 11.3%).

Per quanto sopra l'unità CF è classificabile mediamente come **Sabbia con Limo ghiaiosa e argillosa**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:



*Figura 30: Analisi granulometrica per ciascuno dei campioni lavorati – Unità CF.*



*Figura 31: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità CF.*

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.60 e 2.64 (media 2.61).

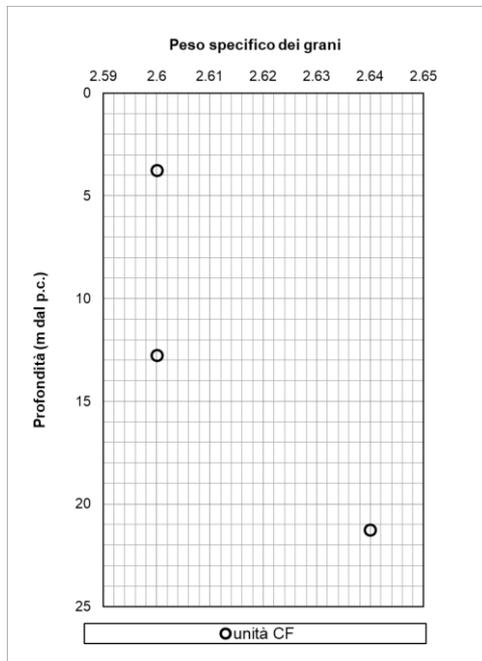


Figura 32: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità CF.

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ KN/m}^3$

Inoltre, su due campioni sono stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato compreso tra 28.2 e 40.9% (media 34.55%), il limite plastico tra 19.6 e 27.8% (media 27.3%), l'indice plastico tra 8.6 e 13.1% (media 10.85%).

In base alla carta di plasticità l'unità CF è classificabile come “Argille di medio-bassa plasticità”.

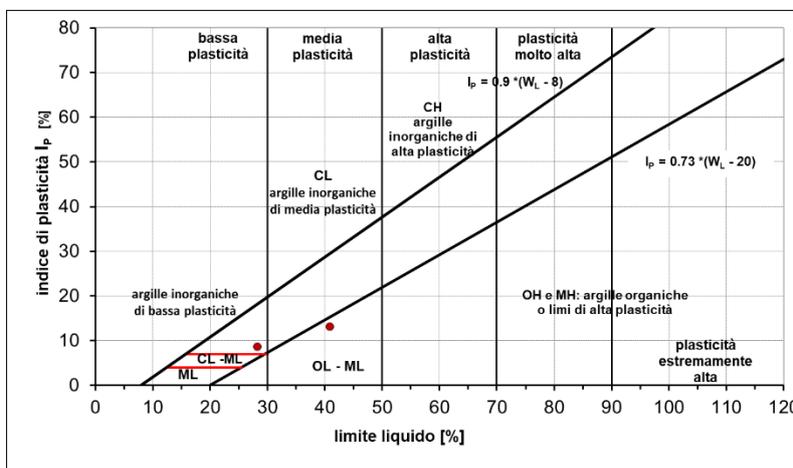
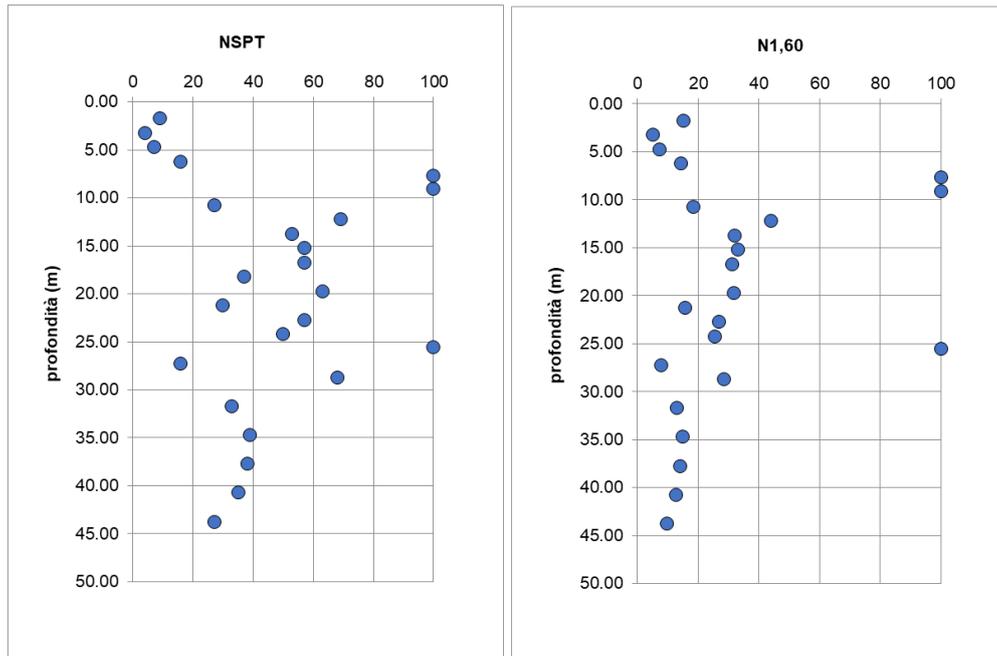


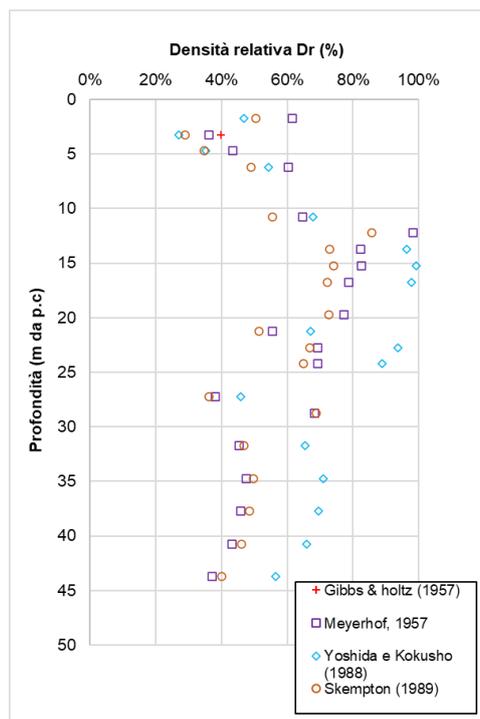
Figura 33: Carta di plasticità di Casagrande – Unità CF.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità CF non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici, pertanto, le caratteristiche di resistenza sono state stimate facendo riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

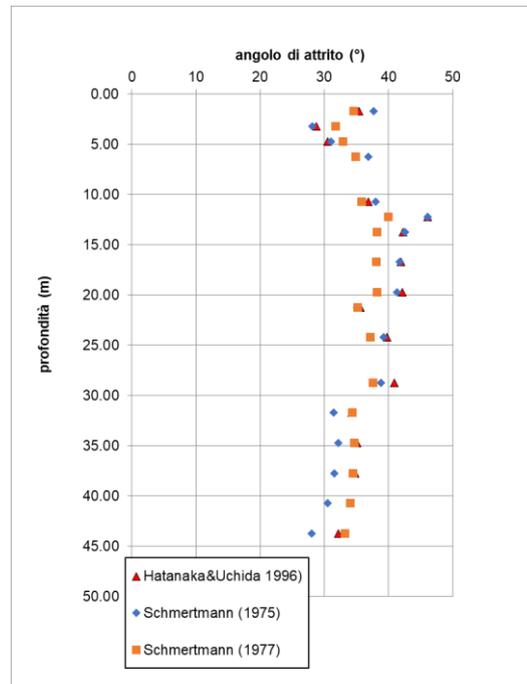


**Figura 34: Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  e  $N_{1,60}$  al variare della profondità da p.c. – Unità CF [le prove “a rifiuto” e quelle non attendibili non sono state considerata nella valutazione della resistenza].**



**Figura 35: Densità relativa al variare della profondità da p.c. – Unità CF.**

Le correlazioni forniscono valori dell'angolo di attrito compresi tra circa i 30° e i 40° come si può notare dal diagramma sottostante. Cautelativamente, ai fini progettuali, si riduce l'intervallo di variazione compreso tra 30° e 35°.



**Figura 36: Angolo di attrito da prove SPT al variare della profondità da p.c. – Unità CF.**

### 8.1.5.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati di seguito. Come mostrato nella Figura sottostante, il modulo dinamico  $E_0$  aumenta linearmente con la profondità; mediante una regressione lineare, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E_0 = (39z + 255.6) \text{ MPa}$$

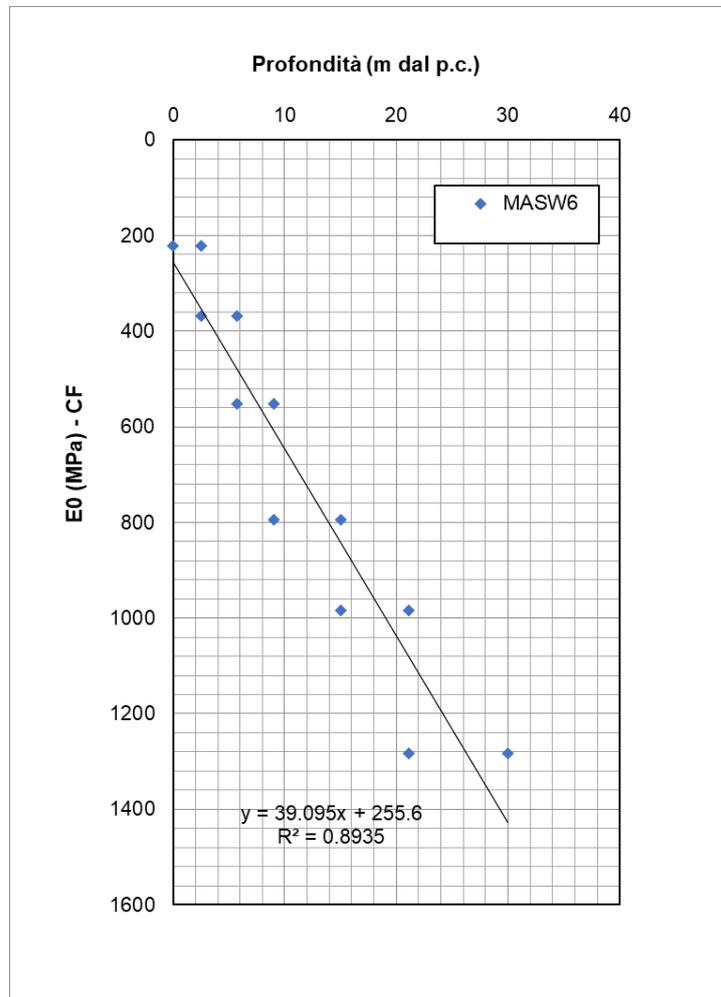


Figura 37: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. – Unità CF.

### 8.1.5.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 3 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è compresa tra  $1.1 \times 10^{-5}$  e  $2.2 \times 10^{-5}$  m/s (media  $1.57 \times 10^{-5}$  m/s).

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S11 IV  | 3.25           | 2.20E-05 | CF     |
| S12 GA  | 20.25          | 1.40E-05 | CF     |
| S12 GA  | 25.25          | 1.10E-05 | CF     |

Tabella 20: Risultati delle prove Lefranc – Unità CF.

#### **8.1.5.4 Unità CF – Sintesi parametri geotecnici di progetto**

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità CF:

- $\gamma = \text{kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 30\text{-}35^\circ$
- $E_0 = (39z + 255) \text{ MPa}$

## 8.1.6 Unità SG

### 8.1.6.1 Identificazione

Si tratta di depositi fluvioglaciali, glaciali e di contatto glaciale, appartenenti al Supersistema di Cantù e costituiti prevalentemente da sabbie e ghiaie, di colore da marrone a grigio.



**Figura 38: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S27 – Unità SG.**

Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati 31 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S1IV      | CR1      | 3.45            |          | X  |        | X  |
| S4IV      | CR2      | 11.25           |          | X  |        | X  |
| S5GA      | CR2      | 10.25           |          | X  |        | X  |
| S6GA      | CR1      | 5.25            |          | X  | X      | X  |
| S7RI      | CR1      | 5.75            |          | X  | X      | X  |
| S7RI      | CR2      | 15.25           |          | X  |        | X  |
| S7RI      | CR3      | 25.75           |          | X  |        | X  |
| S8GA      | CR2      | 10.20           |          | X  |        | X  |
| S8GA      | CR3      | 13.20           |          | X  |        | X  |
| S8GA      | CR5      | 19.20           |          | X  |        | X  |
| S8GA      | CR6      | 22.20           |          | X  |        | X  |
| S8GA      | CR7      | 25.20           |          | X  |        | X  |
| S13IV     | CR1      | 3.75            |          | X  | X      | X  |
| S15GA     | CR2      | 10.25           |          | X  |        | X  |
| S15GA     | CR3      | 13.25           |          | X  |        | X  |
| S15GA     | CR4      | 16.25           |          | X  |        | X  |
| S15GA     | CR5      | 19.25           |          | X  | X      | X  |
| S15GA     | CR6      | 22.25           |          | X  | X      | X  |
| S15GA     | CR7      | 25.25           |          | X  | X      | X  |
| S16RI     | CL3      | 8.75            |          |    | X      | X  |
| S17IV     | CR1      | 2.75            |          | X  | X      | X  |
| S20IV     | CR1      | 4.75            |          | X  |        | X  |
| S20IV     | CR2      | 11.75           |          | X  |        | X  |
| S20IV     | CR3      | 17.75           |          | X  |        | X  |
| S21IV     | CR3      | 14.75           |          | X  |        | X  |
| S22IV     | CR2      | 6.10            |          | X  | X      | X  |
| S27IV     | CR1      | 5.25            |          | X  |        | X  |
| S27IV     | CR2      | 11.25           |          | X  |        | X  |
| S27IV     | CR10     | 15.25           |          | X  |        | X  |
| S29GA     | CR6      | 22.25           |          | X  |        | X  |
| S29GA     | CR7      | 25.25           |          | X  |        | X  |



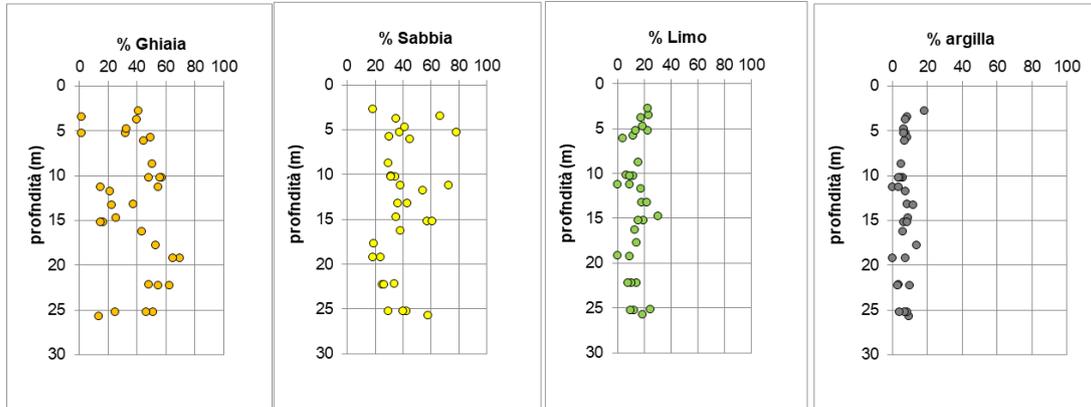


Figura 40: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità SG.

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.61 e 2.73 (media 2.68).

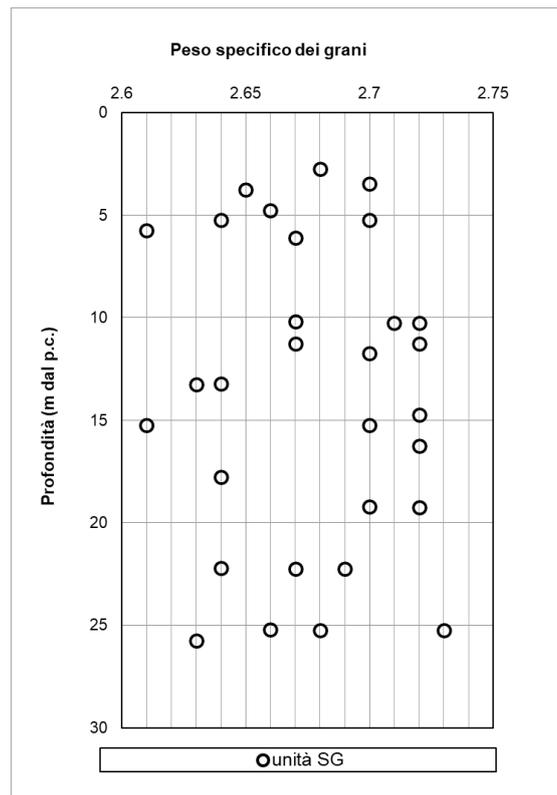


Figura 41: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità SG.

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ KN/m}^3$

Inoltre, su alcuni campioni sono stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato compreso tra 20.5 e 36% (media 26%), il limite plastico tra 12.6 e 26.9% (media 17.2%), l'indice plastico tra 5.4 e 14% (media 8.8%).

In base alla carta di plasticità l'unità SG è classificabile come "Argille di medio-bassa plasticità".

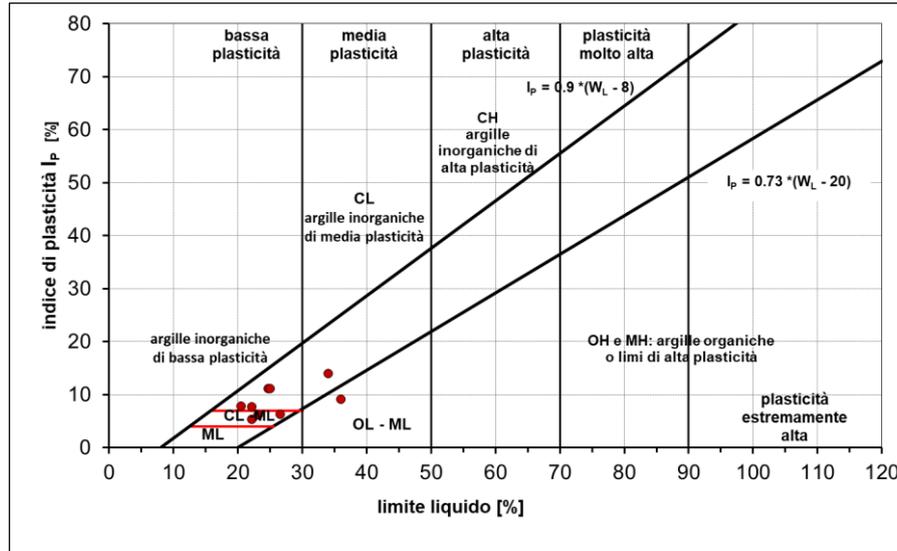


Figura 42: Carta di plasticità di Casagrande – Unità SG.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità SG non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici, pertanto, le caratteristiche di resistenza sono state stimate facendo riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

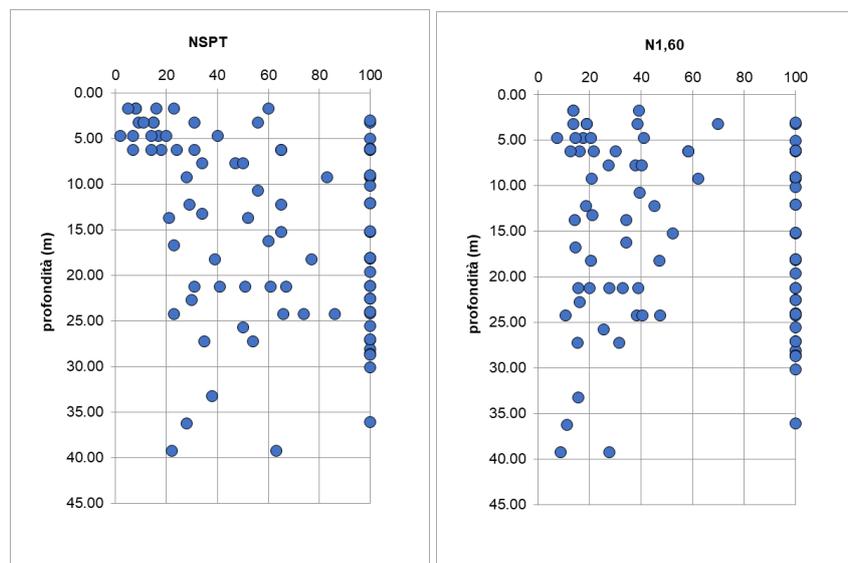
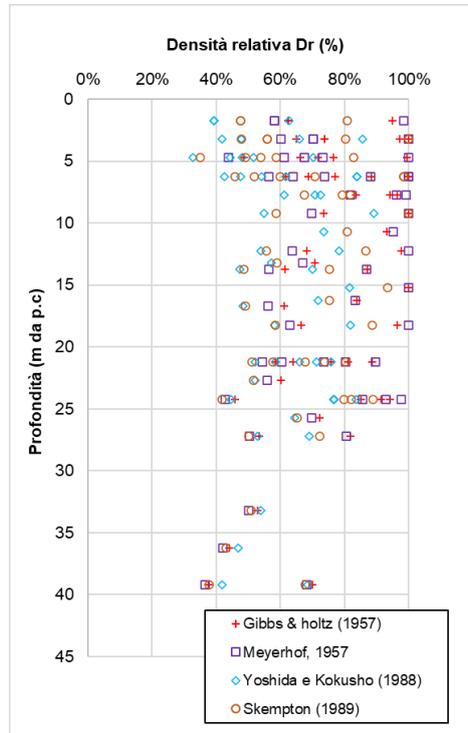
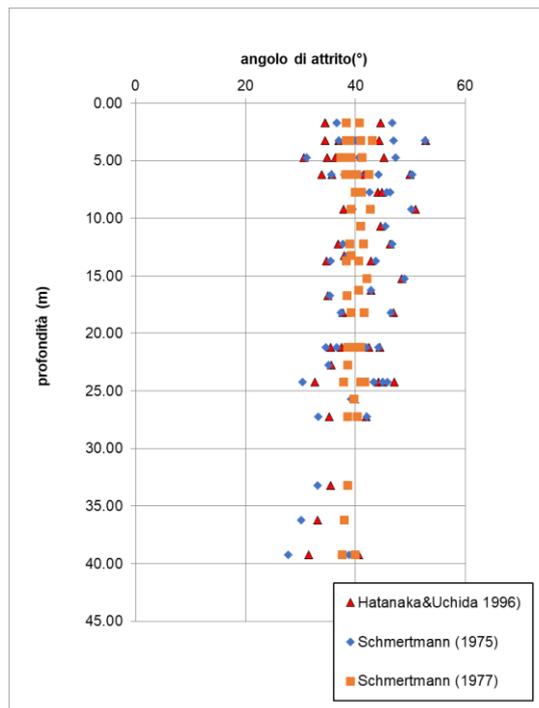


Figura 43: Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  e  $N_{1,60}$  al variare della profondità da p.c. – Unità SG [le prove "a rifiuto" e quelle non attendibili non sono state considerata nella valutazione della resistenza].



*Figura 44: Densità relativa al variare della profondità da p.c. – Unità SG.*

Le correlazioni forniscono valori dell'angolo di attrito compresi tra i 30° e i 45° come si può notare dal diagramma sottostante. Cautelativamente, ai fini progettuali, si riduce l'intervallo di variazione compreso tra 35° e 38°.



*Figura 45: Angolo di attrito da prove SPT al variare della profondità da p.c. – Unità SG.*

### 8.1.6.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW e DH, i cui risultati sono sintetizzati di seguito. Come mostrato nella Figura sottostante, il modulo dinamico  $E_0$  aumenta linearmente con la profondità; mediante una regressione lineare, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E_0 = (48.35z + 352) \text{ MPa}$$

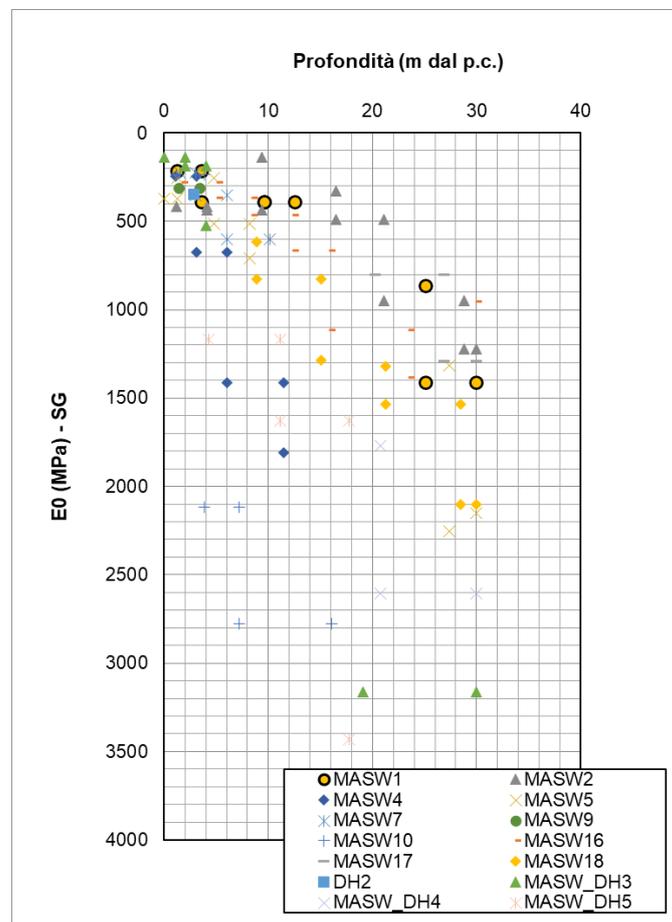
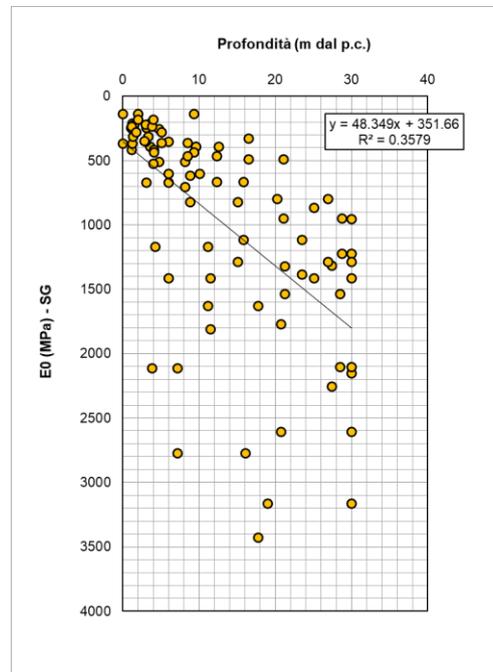


Figura 46: Modulo dinamico  $E_0$  al variare della profondità da p.c. – Unità SG.



**Figura 47: Regressione lineare del modulo dinamico  $E_0$  con la profondità da p.c. – Unità SG.**

### 8.1.6.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 15 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è compresa tra  $8.3 \times 10^{-7}$  e  $5.2 \times 10^{-4}$  m/s (media  $7.9 \times 10^{-5}$  m/s).

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S1 IV   | 5.50           | 2.60E-05 | SG     |
| S2 GA   | 9.50           | 1.50E-05 | SG     |
| S4 IV   | 7.25           | 5.20E-04 | SG     |
| S7 RI   | 2.75           | 8.50E-06 | SG     |
| S8 GA   | 7.25           | 4.30E-06 | SG     |
| S8 GA   | 10.25          | 3.70E-05 | SG     |
| S9 GA   | 1.9            | 5.80E-05 | SG     |
| S9 GA   | 7.5            | 7.10E-05 | SG     |
| S13 IV  | 3.25           | 1.30E-05 | SG     |
| S14 GA  | 8              | 9.80E-05 | SG     |
| S14 GA  | 12.5           | 1.40E-04 | SG     |
| S22 IV  | 8.65           | 1.30E-05 | SG     |
| S23 GA  | 2.25           | 1.20E-04 | SG     |
| S23 GA  | 8.25           | 5.90E-05 | SG     |
| S27 IV  | 5.25           | 8.30E-07 | SG     |

**Tabella 21: Risultati delle prove Lefranc – Unità CF.**

#### **8.1.6.4 Unità SG – Sintesi parametri geotecnici di progetto**

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità SG:

- $\gamma = 19-20 \text{ kN/m}^3$
- $c' = 0 \text{ kPa}$
- $\varphi' = 35-38^\circ$
- $E_0 = (48.35z + 352) \text{ MPa}$

## 8.1.7 Unità SL

### 8.1.7.1 Identificazione

Si tratta di depositi deltizi appartenenti al Supersistema di Cantù e costituiti prevalentemente da sabbie fini e limi, di colore da marrone a grigio.



**Figura 48: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S29 – Unità SL.**

Per l'unità geotecnica in esame sono stato prelevati 13 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S1IV      | CR2      | 13.75           |          | X  |        | X  |
| S1IV      | CR3      | 27.75           |          | X  | X      | X  |
| S1IV      | CR4      | 32.75           |          | X  | X      | X  |
| S4IV      | CR1      | 4.25            |          | X  | X      | X  |
| S5GA      | CR4      | 20.25           |          | X  | X      | X  |
| S6GA      | CR2      | 10.25           |          | X  | X      | X  |
| S8GA      | CR1      | 5.20            |          | X  | X      | X  |
| S8GA      | CR4      | 16.20           |          | X  | X      | X  |
| S29GA     | CR1      | 5.25            |          | X  |        | X  |
| S29GA     | CR2      | 10.25           |          | X  | X      | X  |
| S29GA     | CR3      | 13.25           |          | X  |        | X  |
| S29GA     | CR4      | 16.25           |          | X  | X      | X  |
| S29GA     | CR5      | 19.25           |          | X  | X      | X  |

Dalle analisi granulometriche si ottiene:

- ghiaia compresa fra 0.0 e 34.7% (media 12.0%);
- sabbia compresa fra 13.3 e 56.5% (media 37.0%);
- limo compreso fra 27.7 e 49.0 % (media 35.9%);
- argilla compresa fra 8.3 e 29.6 % (media 15.2%).

Per quanto sopra l'unità **SL** è classificabile mediamente come **Sabbia e Limo argillosa e ghiaiosa**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:

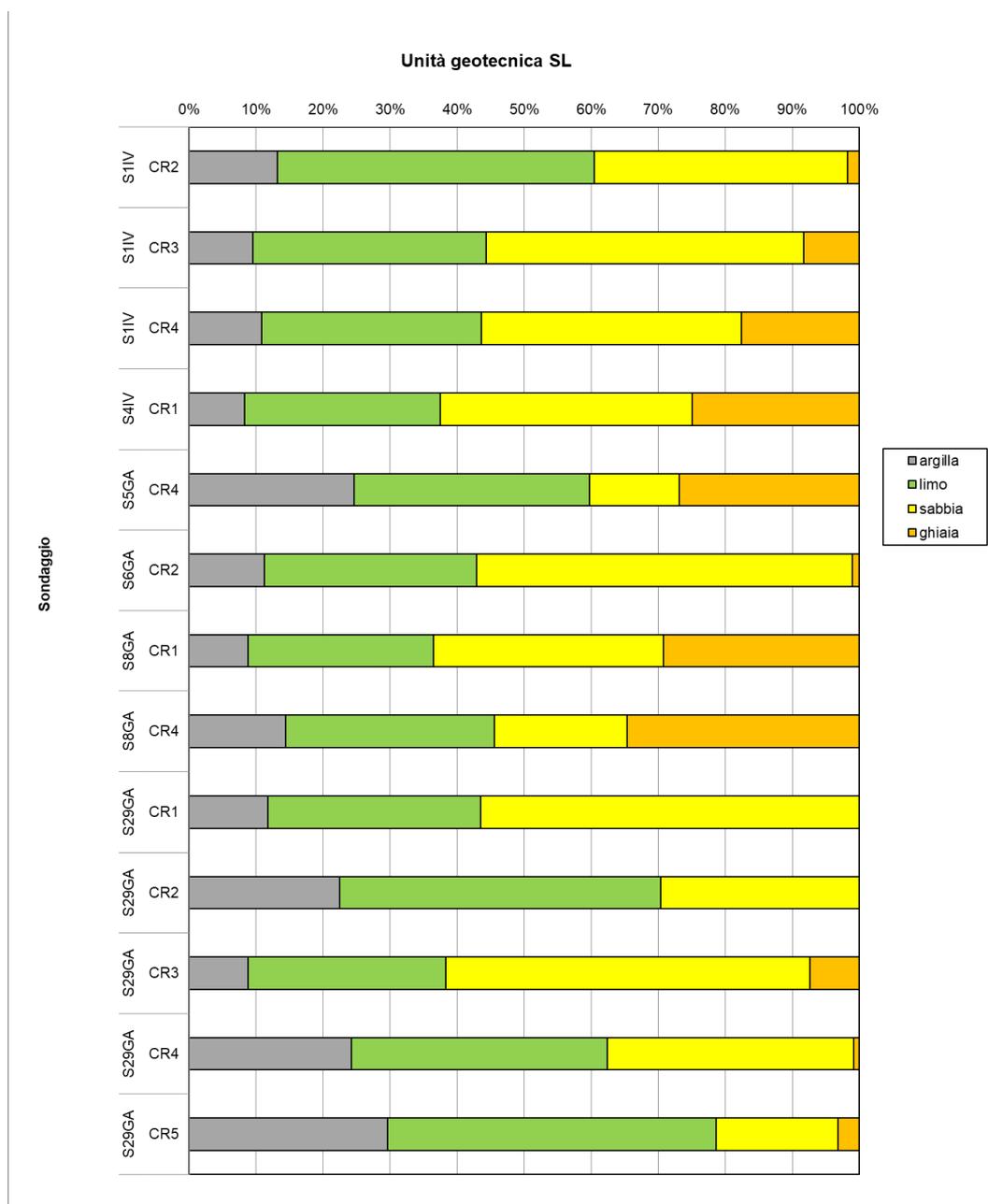
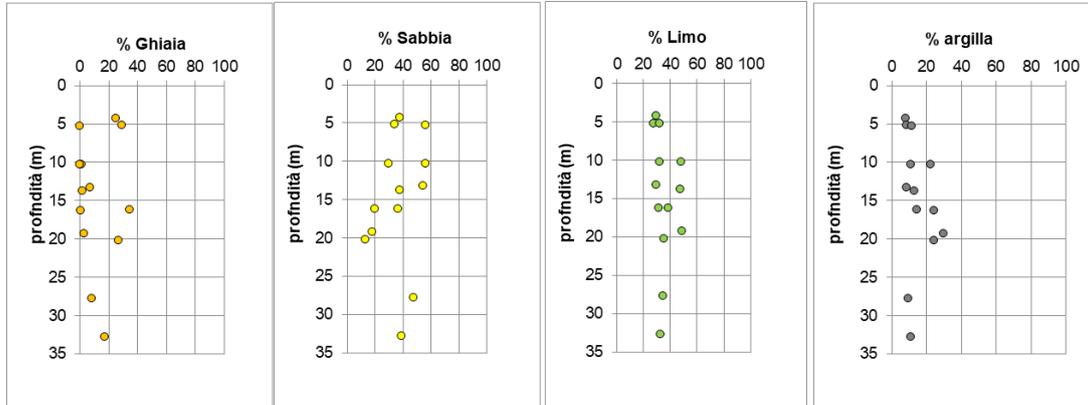
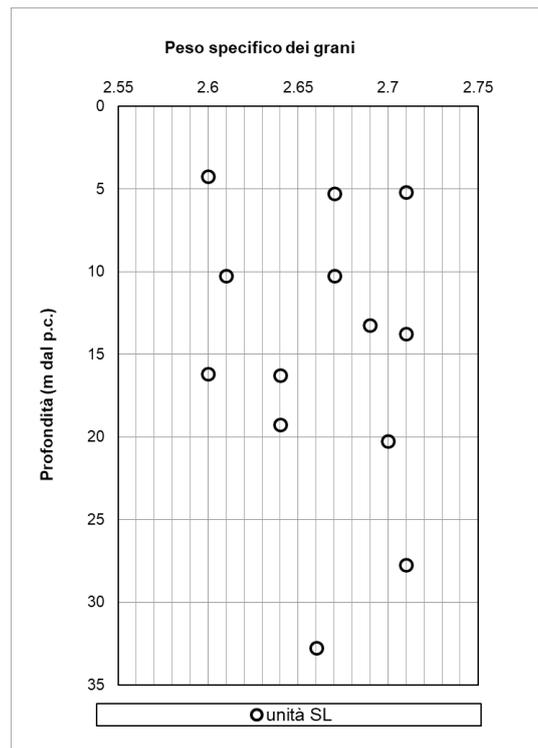


Figura 49: Analisi granulometrica per ciascuno dei campioni lavorati – Unità SL.



**Figura 50: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità SL.**

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.6 e 2.71 (media 2.66).



**Figura 51: Peso specifico dei grani (Gs) al variare della profondità da p.c. – Unità SL.**

Il peso specifico dell'unità di volume non è stato determinato pertanto viene assegnato traendo spunto da dati bibliografici per terreni di simile composizione granulometrica:

➤  $\gamma = 19-20 \text{ KN/m}^3$

Inoltre, sulla maggior parte dei campioni stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato compreso tra 21.4 e 37.1% (media 26%), il limite plastico tra 13.1 e 27% (media 17.9%), l'indice plastico tra 5.2 e 12.2% (media 8.12%).

In base alla carta di plasticità l'unità SL è classificabile come "Argille di medio-bassa plasticità".

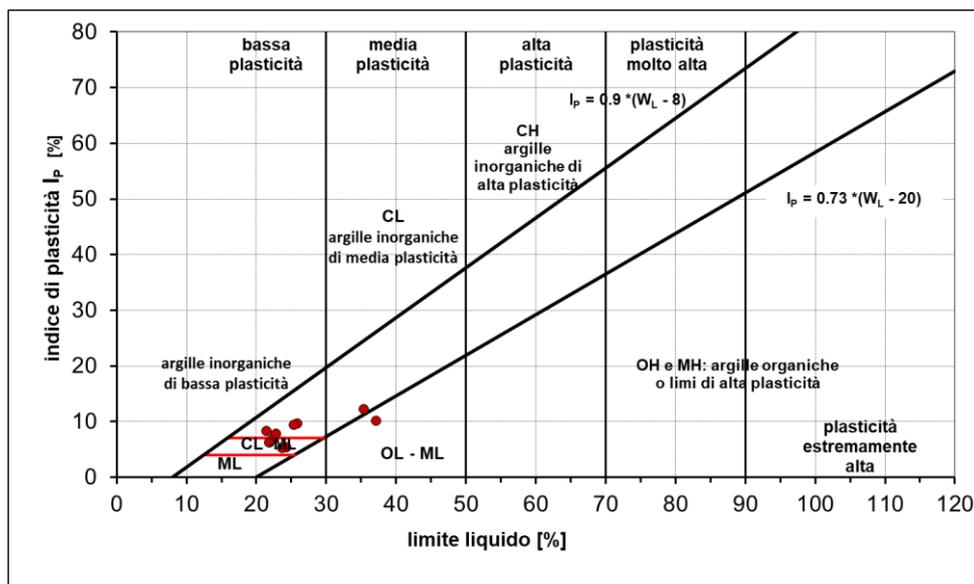


Figura 52: Carta di plasticità di Casagrande – Unità SL.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità SL non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici, pertanto, le caratteristiche di resistenza sono state stimate facendo riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

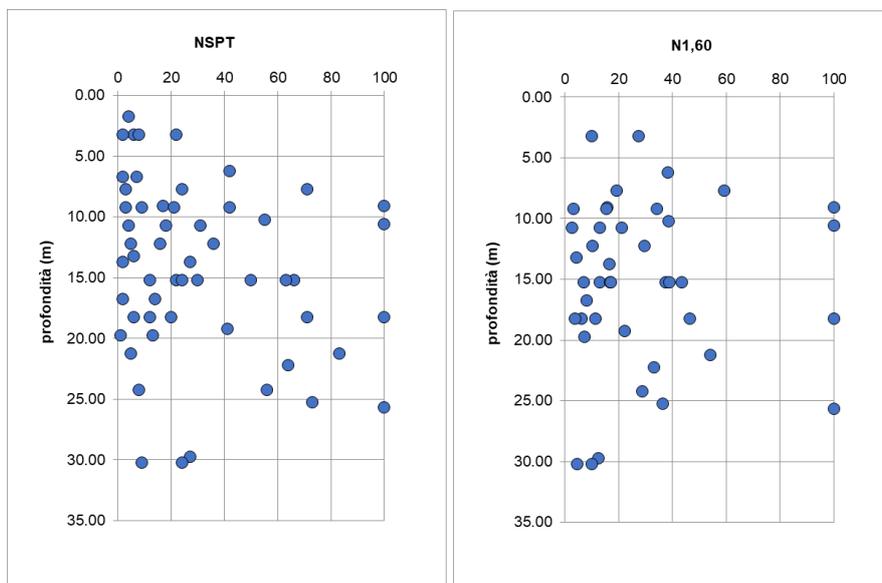
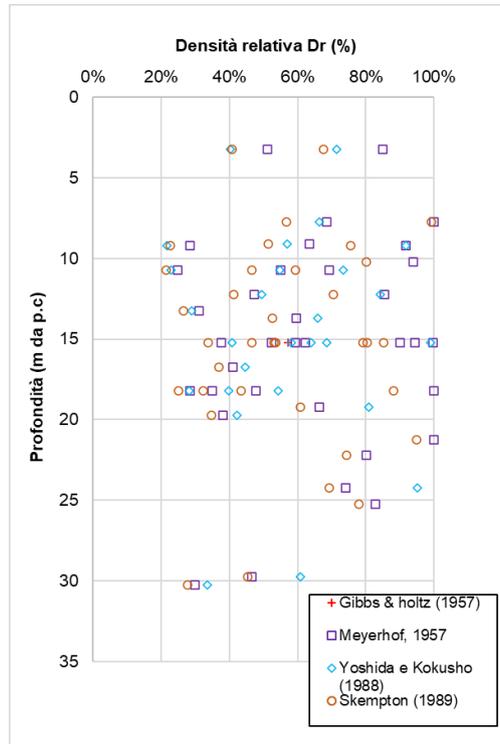
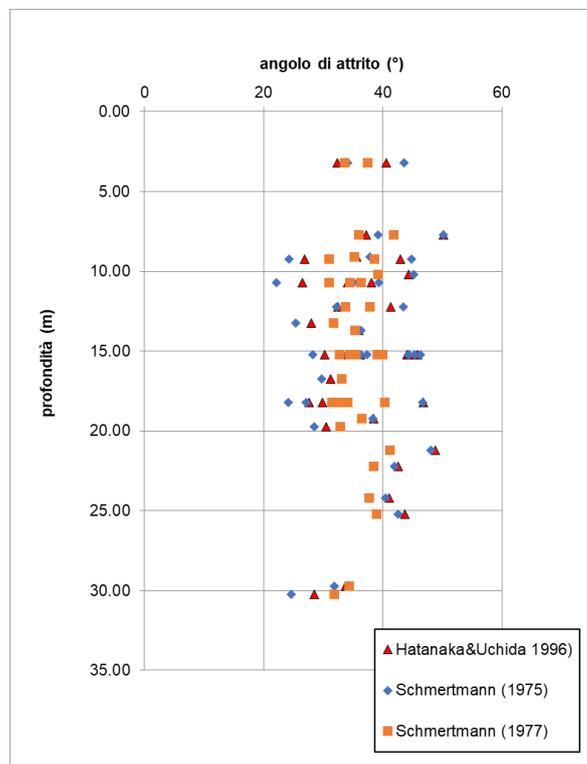


Figura 53: Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  e  $N_{1,60}$  al variare della profondità da p.c. – Unità SL [le prove "a rifiuto" e quelle non attendibili non sono state considerata nella valutazione della resistenza].



*Figura 54: Densità relativa al variare della profondità da p.c. – Unità SL.*



*Figura 55: Angolo di attrito da prove SPT al variare della profondità da p.c. – Unità SL.*

Le correlazioni forniscono valori dell'angolo di attrito compresi tra i 25° e i 45° come si può notare dal diagramma sottostante. Cautelativamente, ai fini progettuali, si riduce l'intervallo di variazione compreso tra 25° e 30°.

### 8.1.7.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati di seguito. Come mostrato nella Figura sottostante, il modulo dinamico  $E_0$  aumenta linearmente con la profondità; mediante una regressione lineare, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E_0 = (29.5z + 232) \text{ MPa}$$

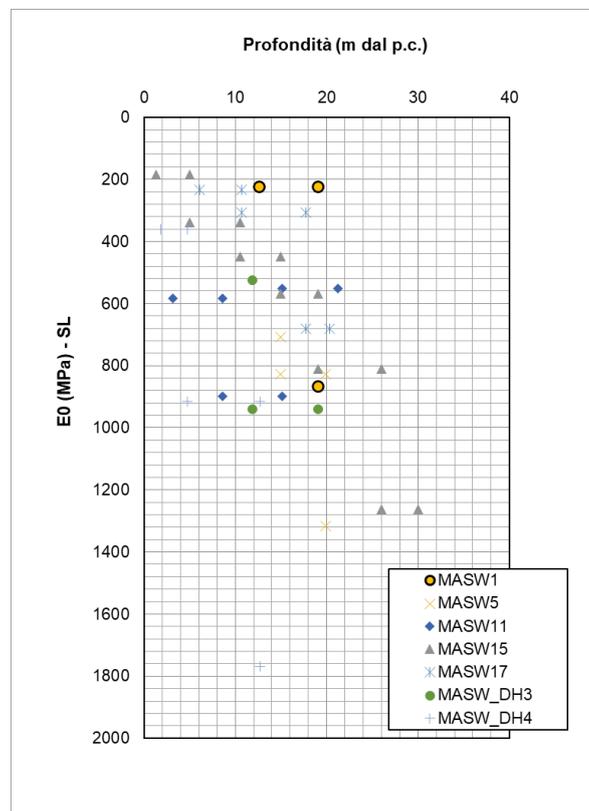
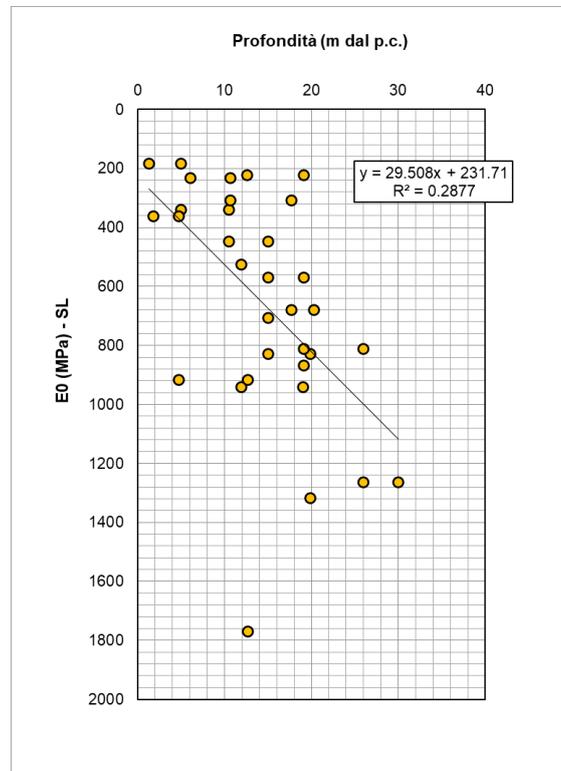


Figura 56: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. – Unità SL.



**Figura 57: Regressione lineare del modulo dinamico  $E_0$  con la profondità da p.c. – Unità SL.**

### 8.1.7.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 6 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è compresa tra  $3.9 \times 10^{-6}$  e  $1.1 \times 10^{-4}$  m/s (media  $1.89 \times 10^{-4}$  m/s).

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S15 GA  | 5.5            | 1.10E-04 | SL     |
| S15 GA  | 9.6            | 4.40E-05 | SL     |
| S19 IV  | 2.25           | 9.60E-06 | SL     |
| S29 GA  | 10.25          | 3.90E-06 | SL     |
| S29 GA  | 15.25          | 1.20E-05 | SL     |
| S30 IV  | 2              | 9.30E-06 | SL     |

**Tabella 22: Risultati delle prove Lefranc – Unità SL.**

#### **8.1.7.4 Unità SL – Sintesi parametri geotecnici di progetto**

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità SL:

- $\gamma=19-20 \text{ kN/m}^3$
- $c'=0 \text{ kPa}$
- $\varphi'=25-30^\circ$
- $E_0=(29.5z + 232) \text{ MPa}$

## 8.1.8 Unità L

### 8.1.8.1 Identificazione

Si tratta di depositi glaciolacustri appartenenti al Supersistema di Cantù e costituiti prevalentemente da terreni limosi-argillosi-sabbiosi, di colore marrone/grigio.



Figura 58: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S22 – Unità L.

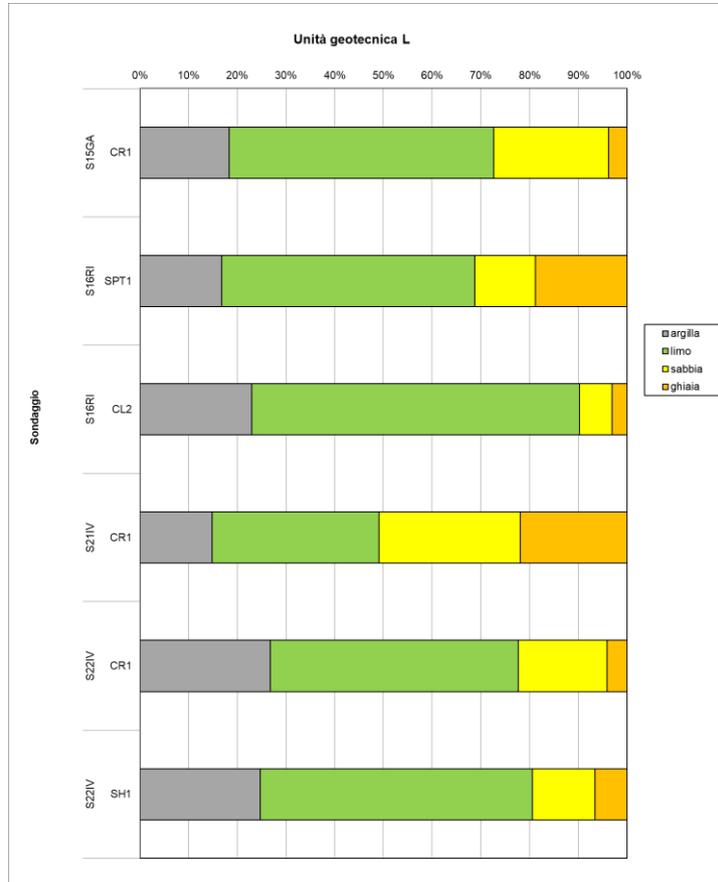
Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati 6 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | Gs | LIMITI | GR |
|-----------|----------|-----------------|----------|----|--------|----|
| S15GA     | CR1      | 5.25            | X        | X  | X      | X  |
| S16RI     | SPT1     | 3.23            |          | X  | X      | X  |
| S16RI     | CL2      | 5.30            | X        | X  | X      | X  |
| S21IV     | CR1      | 9.75            |          | X  | X      | X  |
| S22IV     | CR1      | 3.23            |          | X  | X      | X  |
| S22IV     | SH1      | 14.45           | X        | X  | X      | X  |

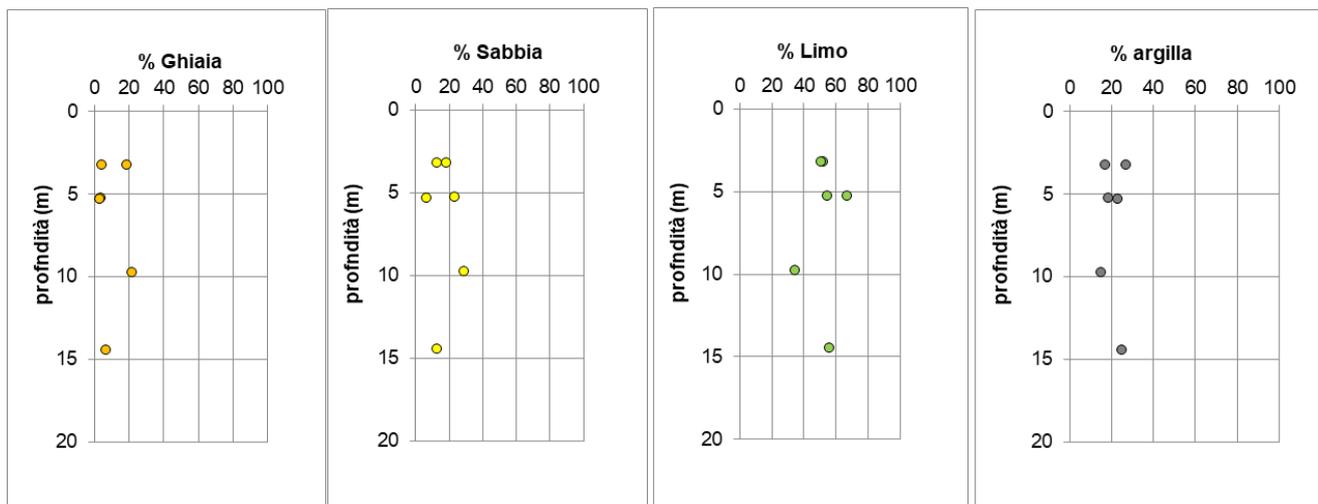
Dalle analisi granulometriche si ottiene:

- ghiaia compresa fra 3.1 e 21.9% (media 9.7%);
- sabbia compresa fra 6.7 e 29% (media 17.1%);
- limo compreso fra 34.3 e 67.2 % (media 52.4%);
- argilla compresa fra 14.8 e 26.8 % (media 20.7%).

Per quanto sopra l'unità L è classificabile mediamente come **Limo argilloso e sabbioso debolmente ghiaioso**. La distribuzione delle varie frazioni con la profondità è mostrata nell'immagine sottostante:



**Figura 59: Analisi granulometrica per ciascuno dei campioni lavorati – Unità L.**



**Figura 60: Distribuzione granulometrica con la profondità del campione – Unità L.**

Il peso specifico dei grani è risultato compreso tra 2.6 e 2.69 (media 2.65) mentre il peso specifico dell'unità di volume è risultato compreso tra 19. KN/m<sup>3</sup> e 20.4 KN/m<sup>3</sup> (media 19.9 KN/m<sup>3</sup>).

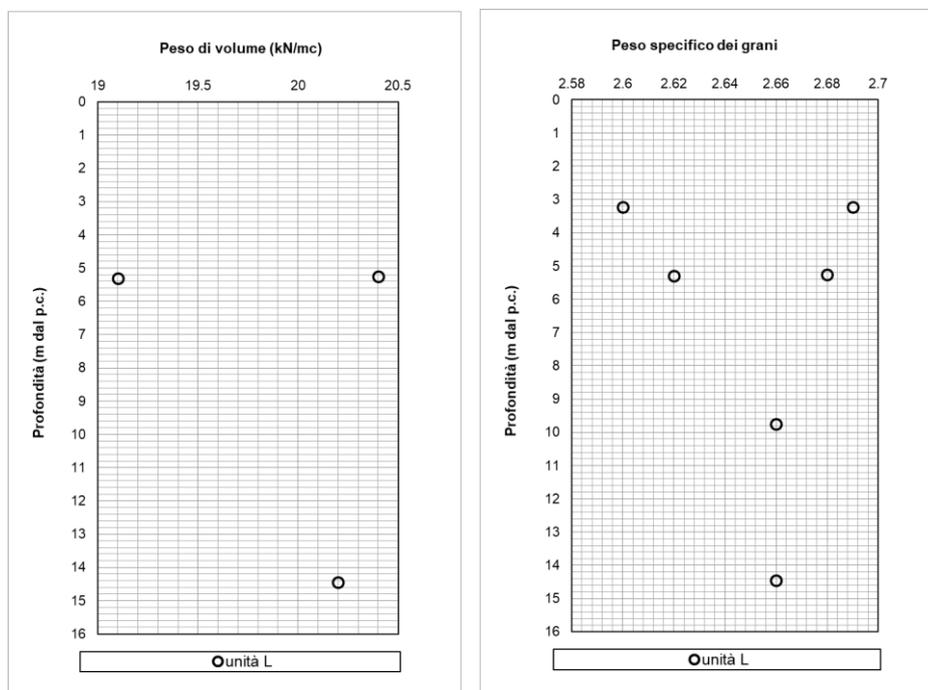


Figura 61: Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) e peso specifico dei grani ( $G_s$ ) al variare della profondità da p.c. – Unità L.

Inoltre, su tutti i campioni sono stati determinati i limiti di Atterberg; il limite liquido è risultato compreso tra 19.2 e 27.2% (media 23.8%), il limite plastico tra 12.8 e 19.1% (media 19%), l'indice plastico tra 6.3 e 9.7% (media 7.8%).

In base alla carta di plasticità l'unità SL è classificabile come "Argille di bassa plasticità".

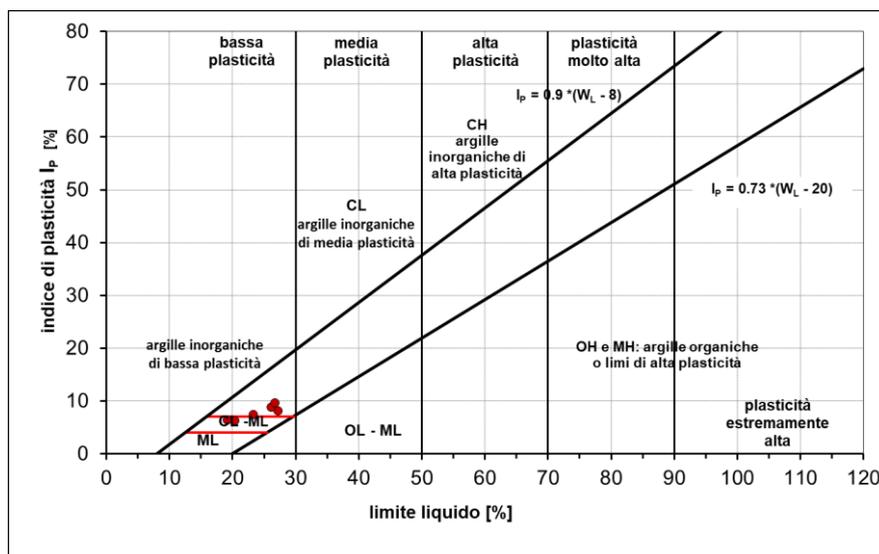


Figura 62: Carta di plasticità di Casagrande – Unità L.

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per l'unità L non è stata condotta alcuna prova in laboratorio volta a determinare i parametri meccanici, pertanto, le caratteristiche di resistenza sono state stimate facendo riferimento ai risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT (l'unico valore attendibile ottenuto fa riferimento al sondaggio S22) e alle prove speditive su carote (Pocket Test). Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

In generale, i valori ottenuti sono molto dispersivi e compresi tra circa 50 e 200 kPa; per tale ragione non si ritiene opportuno interpretare la coesione non drenata mediante un andamento lineare con la profondità. Si decide quindi di ridurre cautelativamente l'intervallo di variazione e caratterizzare il materiale mediante una coesione non drenata compresa tra 50 kPa e 150kPa.

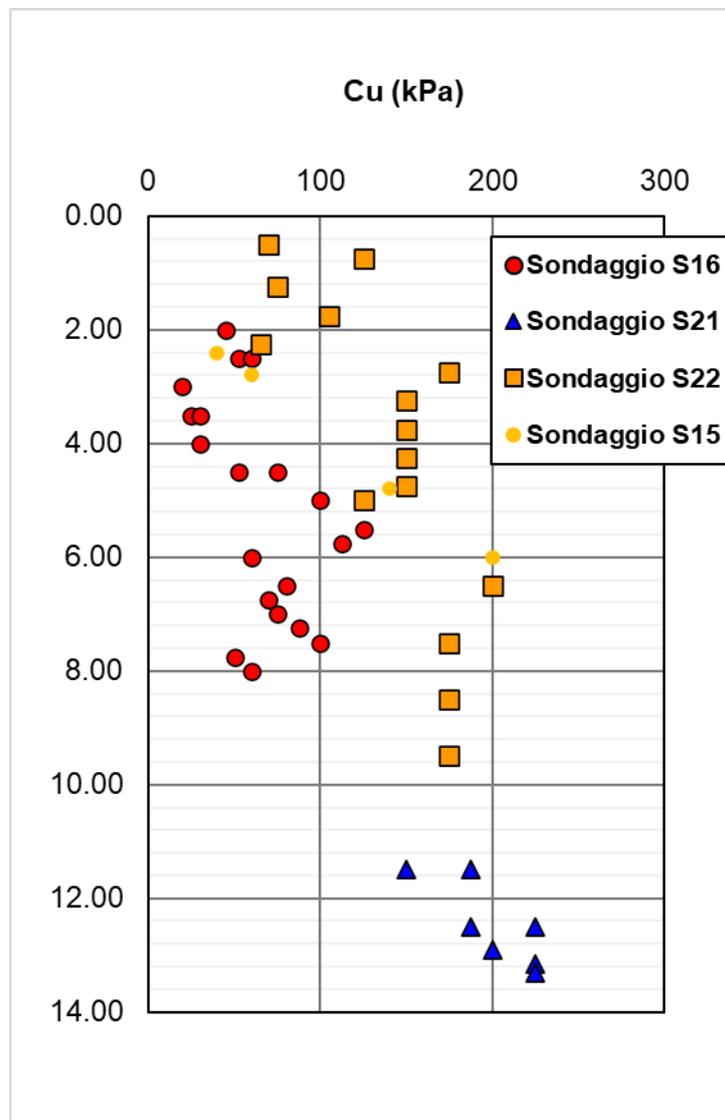
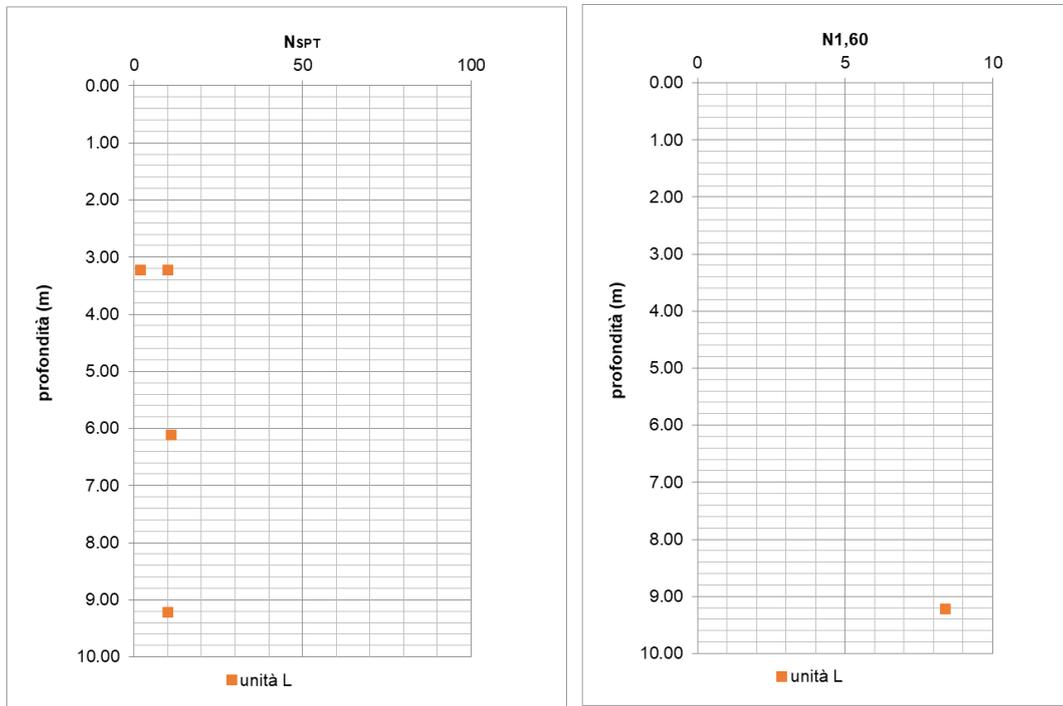
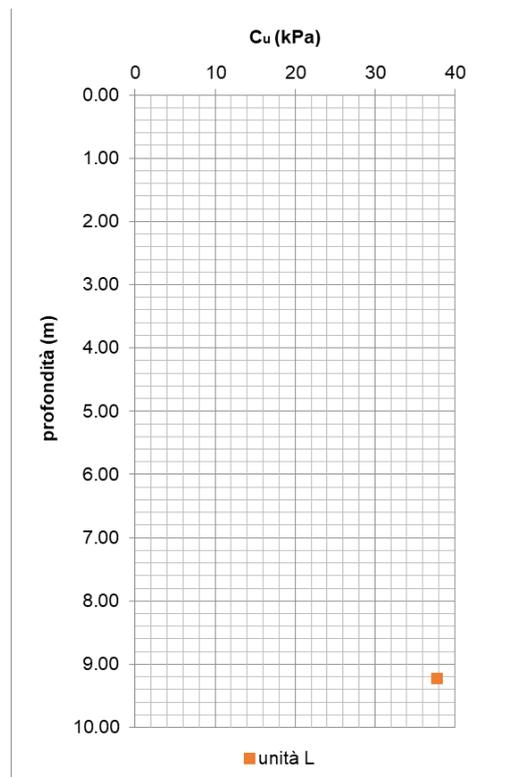


Figura 63: Coesione non drenata da Pocket Test su carote al variare della profondità – Unità L.



**Figura 64:** Valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  e  $N_{1,60}$  al variare della profondità da p.c. – Unità L [le prove “a rifiuto” e quelle non attendibili non sono state considerata nella valutazione della resistenza].



**Figura 65:** Coesione non drenata stimata da prove penetrometriche dinamiche SPT mediante la correlazione di Stroud (1974) al variare della profondità.

### 8.1.8.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati nella che segue. Il valore medio del modulo dinamico  $E_0$  è pari a circa 220 MPa fino a 20 m di profondità, pari a circa 420 MPa da 20 a 30 m.

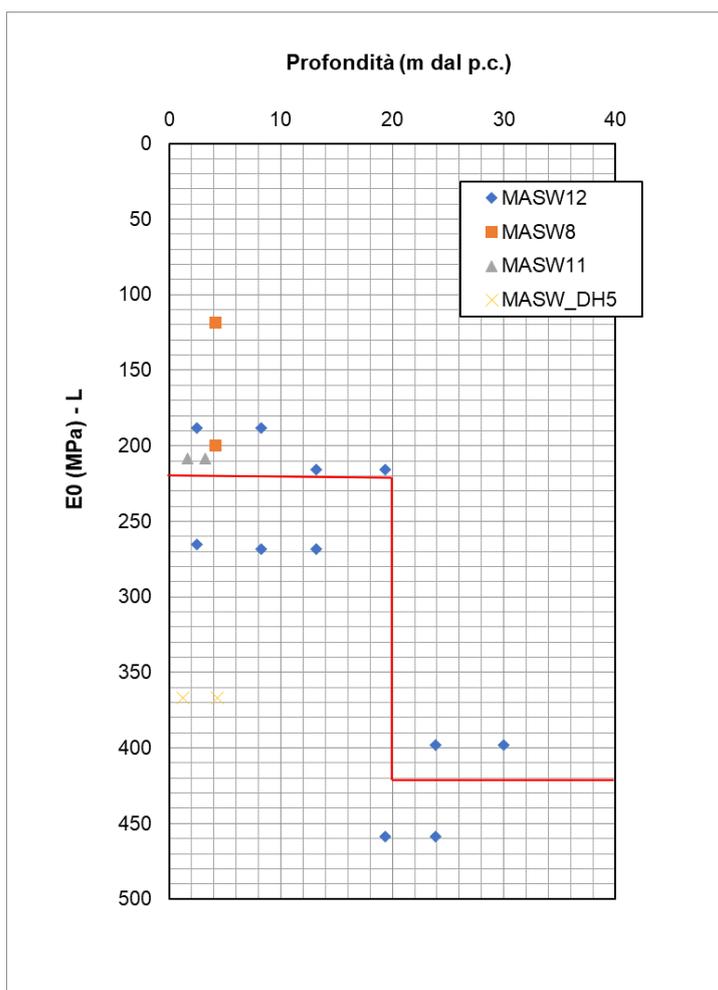


Figura 66: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. – Unità L.

### 8.1.8.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 1 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è pari a  $9.2 \times 10^{-7}$  m/s.

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S21 IV  | 2.75           | 9.20E-07 | L      |

Tabella 23: Risultati delle prove Lefranc – Unità L.

#### **8.1.8.4 Unità L – Sintesi parametri geotecnici di progetto**

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità L:

- $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$
- $c_u= 50 - 150 \text{ kPa}$
- $E_0= 220\text{MPa} \quad z < 20 \text{ m}$   
 $E_0= 420\text{MPa} \quad z > 20 \text{ m}$

## 8.2 DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE LAPIDEE INDIVIDUATE

### 8.2.1 Unità AM

#### 8.2.1.1 Identificazione

Si tratta dell'unità litostratigrafica peliti di Prestino. Le peliti di Prestino sono costituite da argille marnoso-siltose di colore grigio-verde ad alterazione grigio-nocciola con intercalazioni di areniti fini in strati da fini a medi, con base netta, a laminazione piano-parallela e a ripple; tali intercalazioni sono più frequenti nella porzione inferiore. La stratificazione è generalmente sottile, ma spesso vi sono intervalli amalgamati dove la stratificazione è mal distinguibile. Frustoli vegetali limonitizzati o carbonificati sono comuni.

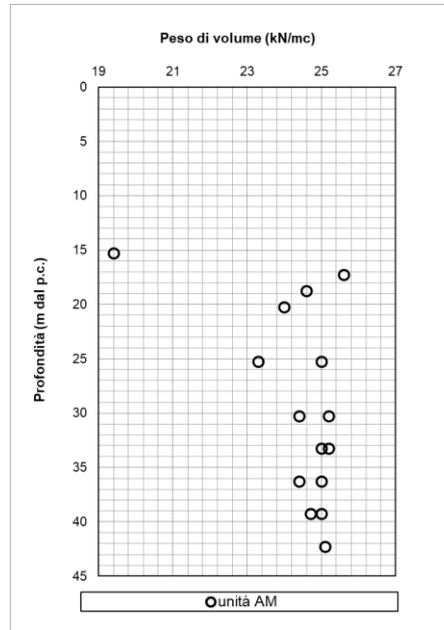


Figura 67: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S6 – Unità AM.

Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati 14 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | unità geotecnica | Misure di velocità sonica | Compressione Monoassiale | Trazione diretta | Point Load Test |
|-----------|----------|-----------------|----------|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| S5GA      | CR5      | 25.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |
| S5GA      | CR6      | 30.25           | X        | AM               | X                         | X                        | X                |                 |
| S5GA      | CR7      | 33.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |
| S5GA      | CR8      | 36.25           | X        | AM               | X                         | X                        | X                |                 |
| S6GA      | CR3      | 15.25           | X        | AM               |                           |                          |                  | X               |
| S6GA      | CR4      | 20.25           | X        | AM               |                           |                          |                  | X               |
| S6GA      | CR5      | 25.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |
| S6GA      | CR6      | 30.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |
| S6GA      | CR7      | 33.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |
| S6GA      | CR8      | 36.25           | X        | AM               |                           |                          |                  |                 |
| S6GA      | CR9      | 39.25           | X        | AM               |                           |                          |                  |                 |
| S6GA      | CR10     | 42.25           | X        | AM               |                           |                          |                  |                 |
| S10IV     | CR3      | 17.25           | X        | AM               | X                         | X                        |                  |                 |

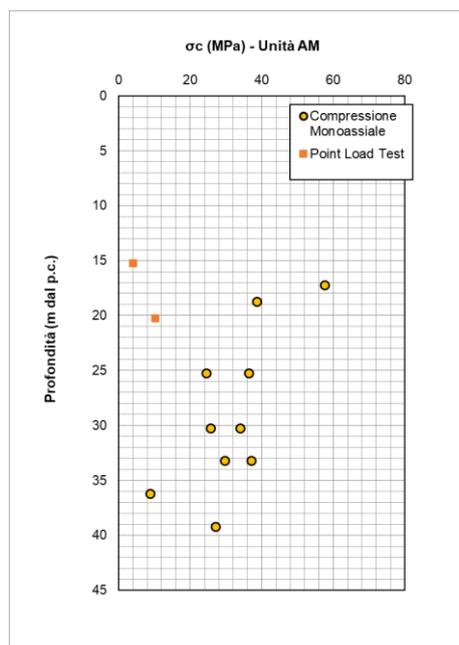
Il peso dell'unità di volume è risultato compreso tra 19.4 e 25.6 kN/m<sup>3</sup> (media 24.4 kN/m<sup>3</sup>).



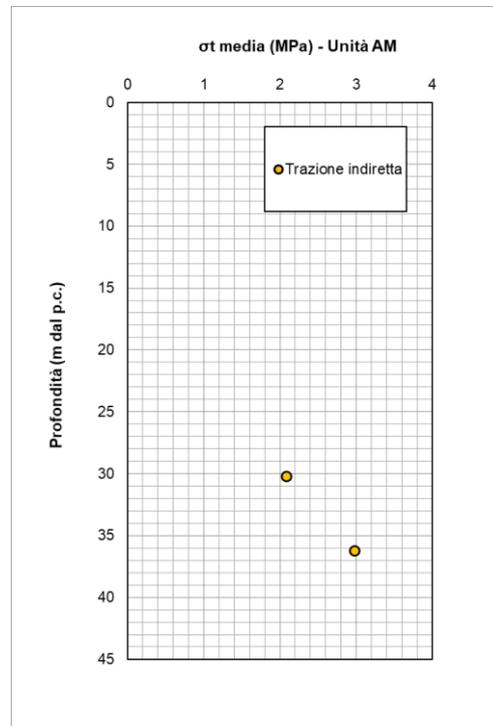
**Figura 68: Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) – Unità AM.**

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per tale unità sono state eseguite prove volte a determinare la resistenza a compressione e a trazione. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.



**Figura 69: Resistenza a compressione  $\sigma_c$  al variare della profondità da p.c. – Unità AM.**



*Figura 70: Resistenza a trazione  $\sigma_t$  al variare della profondità da p.c. – Unità AM.*

In generale, l'unità AM è caratterizzata da una resistenza a compressione dei provini compresa tra circa 10 e 50 MPa e da una a trazione compresa tra 2 e 3 MPa.

#### 8.2.1.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle prove di laboratorio e delle indagini sismiche (MASW e DH), i cui risultati sono sintetizzati nella che segue. Facendo riferimento maggiormente alle prove geofisiche, mediante le quale si riesce a studiare il comportamento deformativo dell'unità in macroscale, si osserva che i valori del modulo dinamico  $E_0$  aumentano linearmente con la profondità; mediante una regressione lineare, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E_0 = 191z \text{ MPa}$$

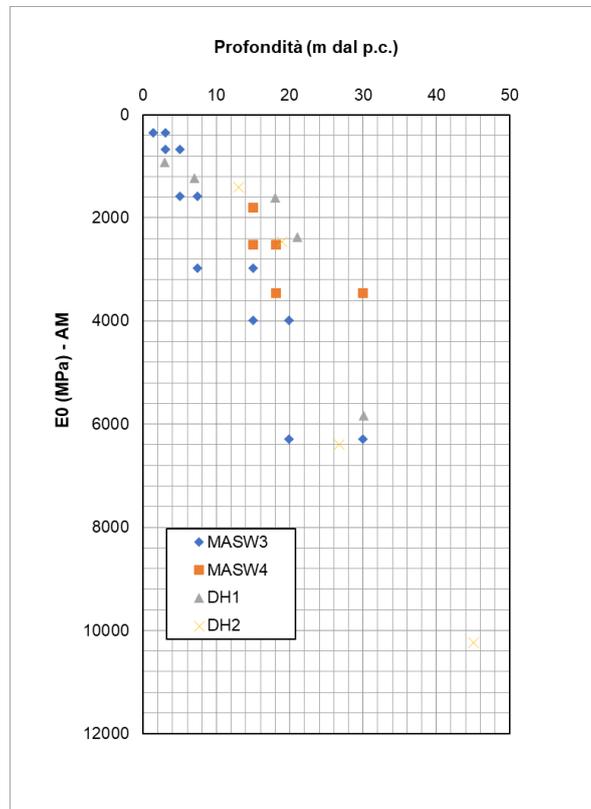


Figura 71: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. da indagini geofisiche – Unità AM.

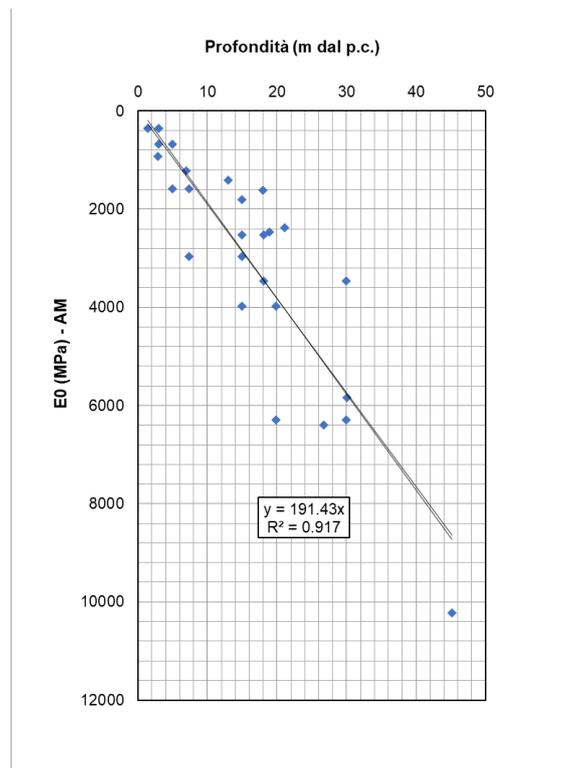
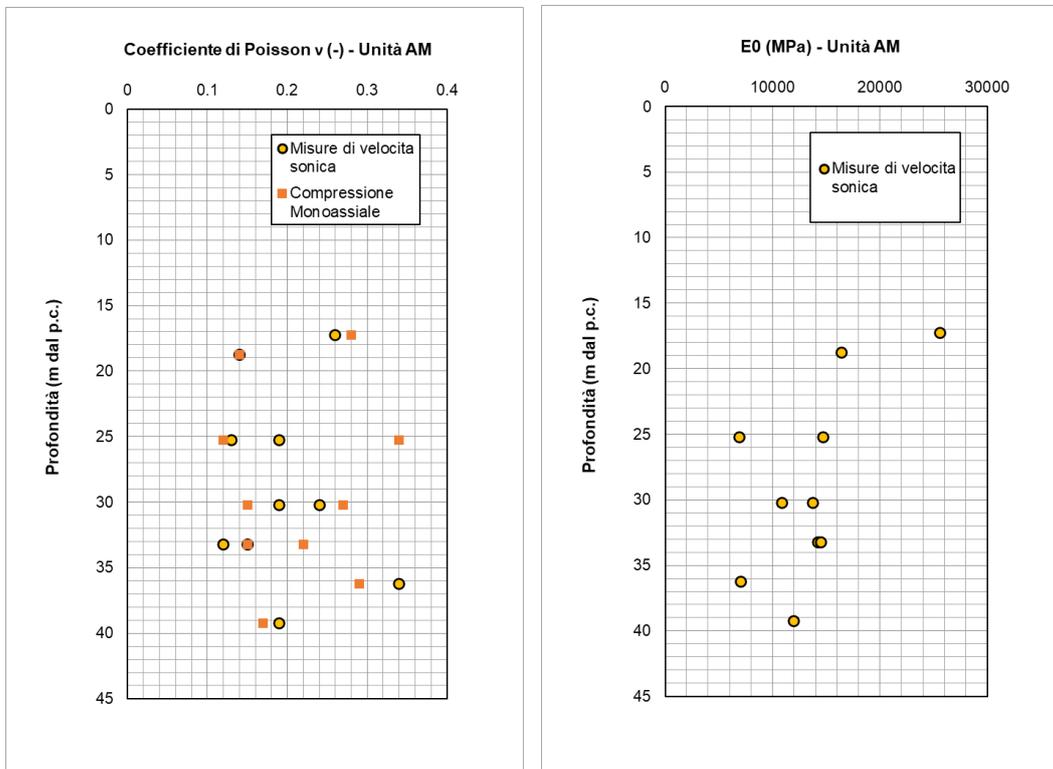


Figura 72: Regressione lineare del modulo dinamico  $E_0$  con la profondità da p.c. da indagini geofisiche – Unità AM (l'intercetta è stata impostata a 0 MPa per non avere valori negativi di rigidezza al p.c.).



**Figura 73: Modulo dinamico  $E_0$  e coefficiente di Poisson  $\nu$  (-) variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità AM.**

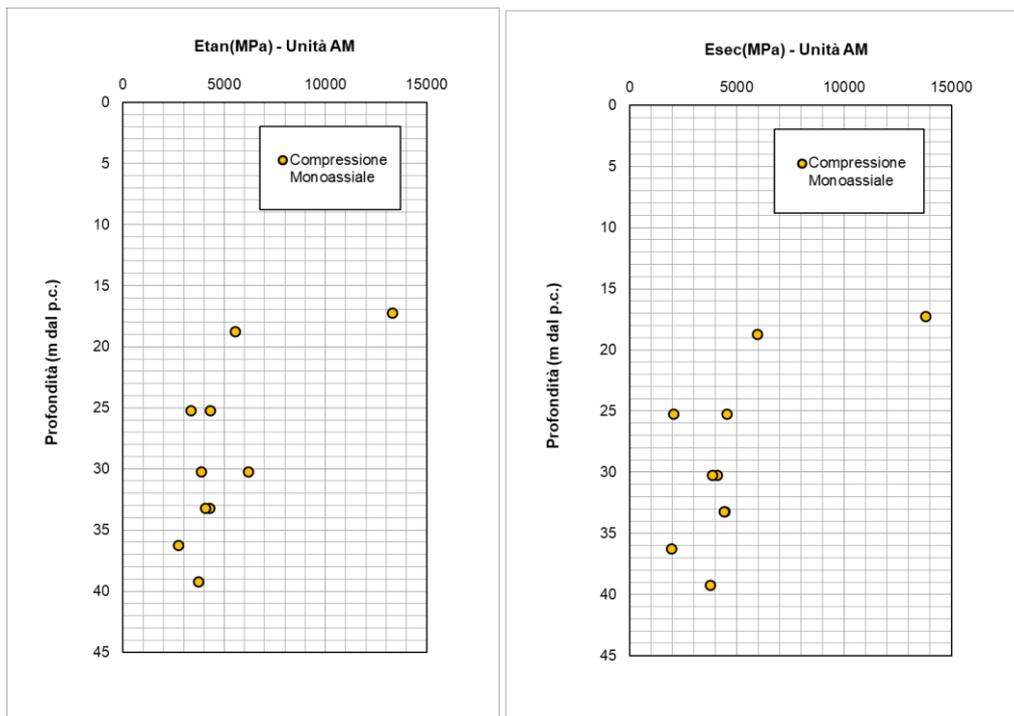


Figura 74: Modulo tangente  $E_{tan}$  e modulo secante  $E_{sec}$  al variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità AM.

### 8.2.1.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 2 prove Lefranc e num. 3 prove Lugeon, i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è compresa tra  $2.4 \times 10^{-6}$  e  $1.29 \times 10^{-5}$  m/s (media  $6.61 \times 10^{-6}$  m/s).

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S2 GA   | 17.50          | 2.40E-06 | AM     |
| S5 GA   | 19.5           | 6.20E-06 | AM     |

Tabella 24: Risultati delle prove Lefranc – Unità AM.

| LUGEON    |                |          |        |
|-----------|----------------|----------|--------|
| BH        | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S5 GA     | 32.00          | 2.90E-06 | AM     |
| S6 GA bis | 26.00          | 1.29E-05 | AM     |
| S6 GA bis | 31.00          | 8.66E-06 | AM     |

Tabella 25: Risultati delle prove Lugeon Unità AM.

### 8.2.1.4 Unità AM – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità AM:

- $\gamma = 24-25$  kN/m<sup>3</sup>
- $\sigma_{c\_campione} = 10-50$  MPa
- $E_0 = (191z)$  MPa

## 8.2.2 Unità FBG

### 8.2.2.1 Identificazione

Alternanze di peliti e arenarie in strati da sottili a spessi, talora organizzati in cicli coarsening-upward; strati arenitici gradati e laminati (sequenze di Bouma Ta-e e Tb-e) con frequenti controimpronte e tracce di bioturbazione alla base. Componente arenitica media e grossolana prevalente nell'area orientale (Viganò e Garbagnate Monastero) dove si osservano anche intercalazioni di calcilutiti fini biancastre, in strati piano-paralleli sottili (Missaglia-Viganò).

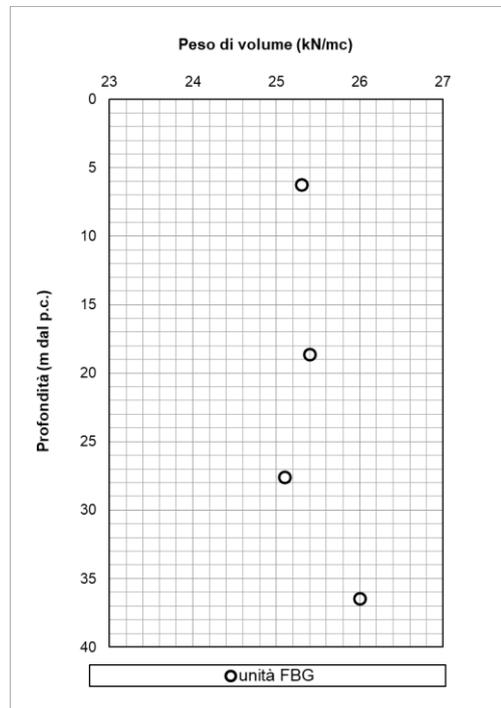


Figura 75: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S20 – Unità FBG.

Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati 4 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | unità geotecnica | Misure di velocità<br>sonica | Compressione<br>Monoassiale | Trazione<br>diretta | Point Load Test |
|-----------|----------|-----------------|----------|------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| S17IV     | CR2      | 6.25            | X        | FBG              | X                            | X                           | X                   |                 |
| S17IV     | CR3      | 18.60           | X        | FBG              | X                            | X                           | X                   |                 |
| S17IV     | CR4      | 27.60           | X        | FBG              | X                            | X                           | X                   |                 |
| S21IV     | CR4      | 36.45           | X        | FBG              |                              |                             | X                   |                 |

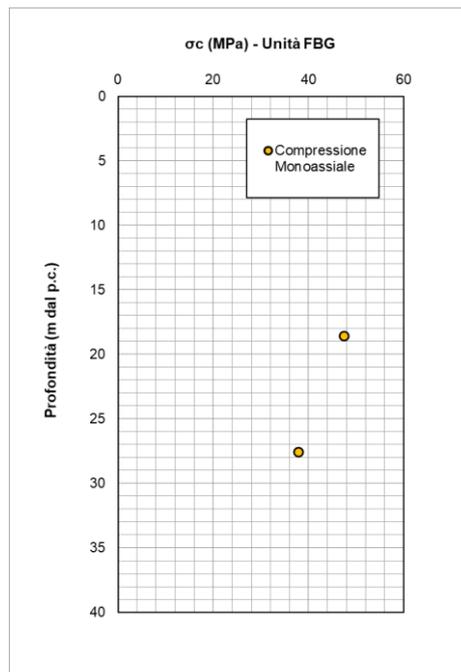
Il peso dell'unità di volume è risultato compreso tra 25.1 e 26 kN/m<sup>3</sup> (media 25.45 kN/m<sup>3</sup>).



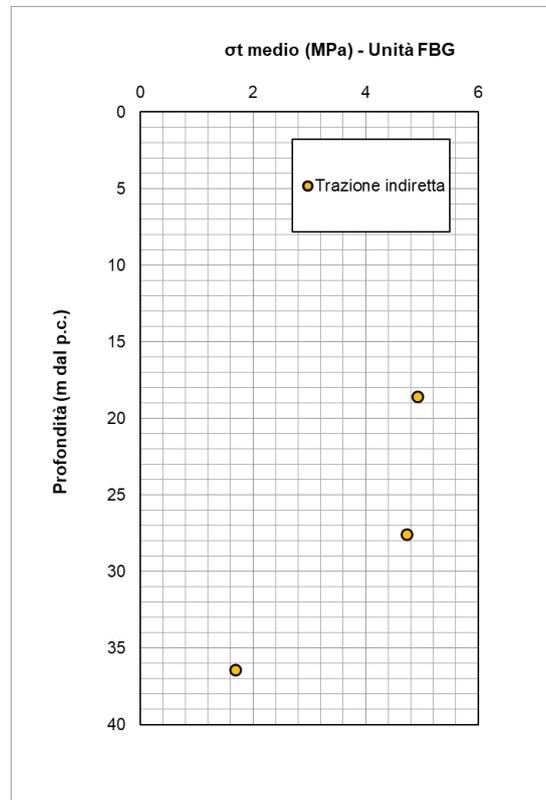
**Figura 76: Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) – Unità FBG.**

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per tale unità sono state eseguite prove volte a determinare la resistenza a compressione e a trazione. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.



**Figura 77: Resistenza a compressione  $\sigma_c$  al variare della profondità da p.c. – Unità FBG.**



**Figura 78: Resistenza a trazione  $\sigma_t$  al variare della profondità da p.c. – Unità FBG.**

In generale, l'unità FBG è caratterizzata da una resistenza a compressione compresa tra circa 40 e 50 MPa e da una a trazione compresa tra circa 2 e 5 MPa.

#### 8.2.2.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle prove di laboratorio e delle indagini sismiche MASW, i cui risultati sono sintetizzati nella che segue. Facendo riferimento maggiormente alle prove geofisiche, mediante le quale si riesce a studiare il comportamento deformativo dell'unità in macroscale, si osserva che i valori relativi alle MASW 9 e 11 sono coerenti tra loro, mentre i valori appartenenti alla MASW 10 e MASW\_DH5 risultano sensibilmente più alti rispetto alla mediana delle altre due prove; per tale ragione si effettua una regressione lineare considerando i risultati delle prove 9 e 11. In conclusione, la deformabilità del materiale può essere descritta con la seguente espressione:

$$E_0 = (69z + 804) \text{ MPa}$$

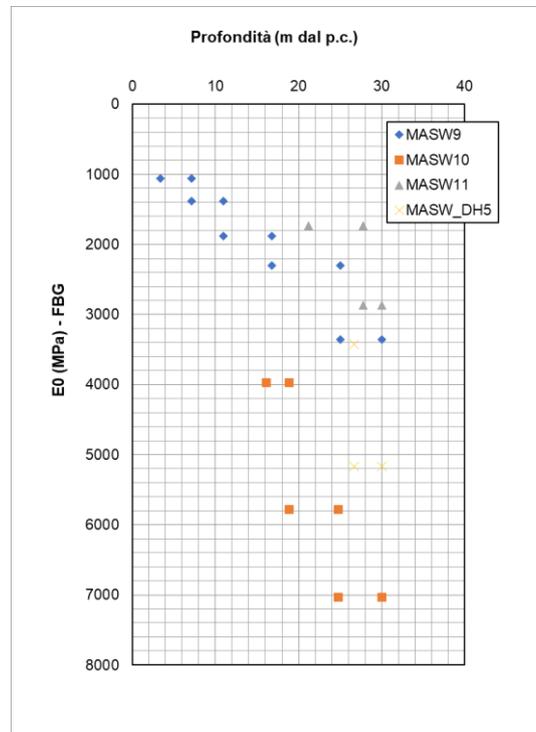


Figura 79: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. da indagini geofisiche – Unità FBG.

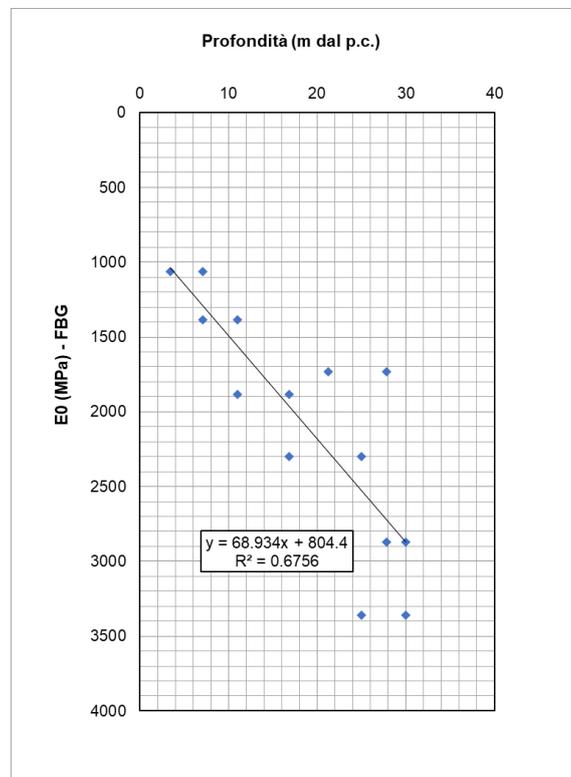


Figura 80: Regressione lineare del modulo dinamico  $E_0$  con la profondità da p.c. da indagini geofisiche MASW 9 e 11 – Unità FBG.

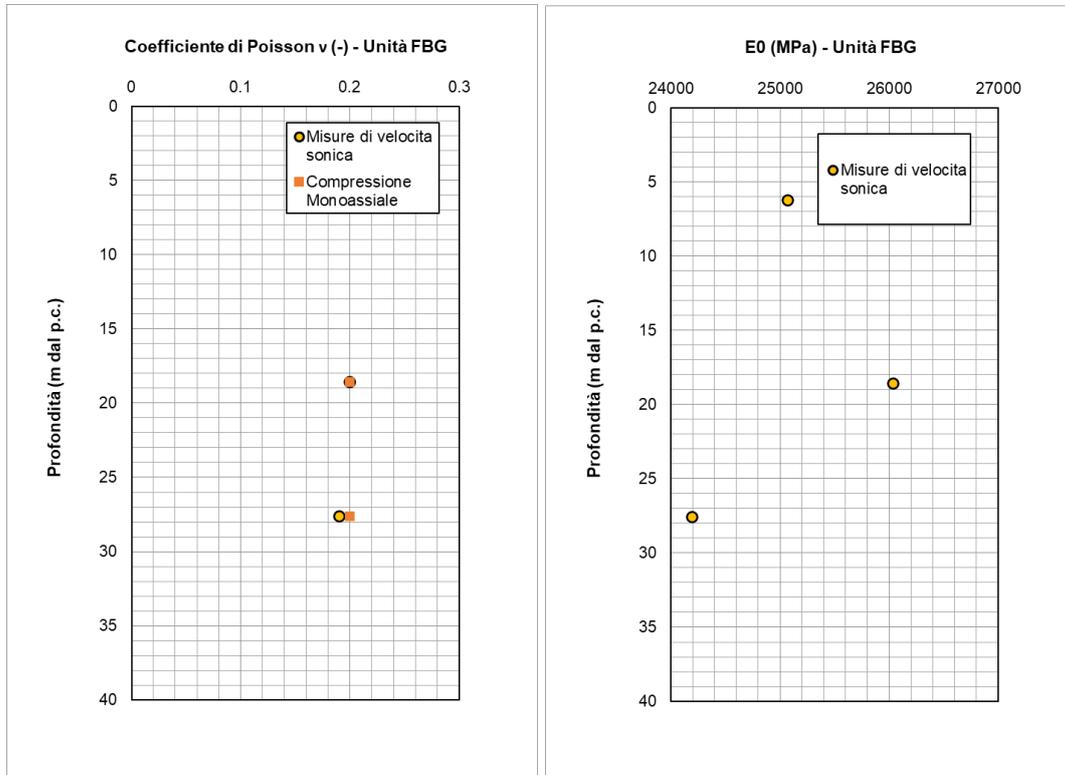


Figura 81: Modulo dinamico  $E_0$  e coefficiente di Poisson  $\nu$  (-) variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità FBG.

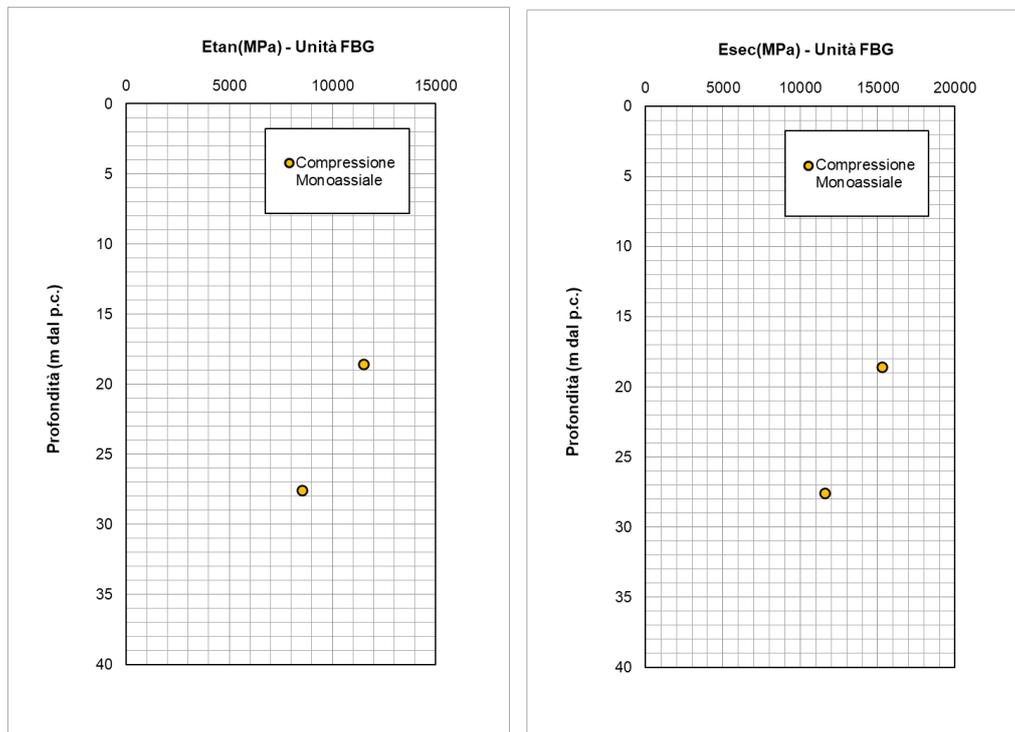


Figura 82: Modulo tangente  $E_{tan}$  e modulo secante  $E_{sec}$  al variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità FBG.

### 8.2.2.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 1 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è pari a  $4.7 \times 10^{-6}$  m/s.

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S17 IV  | 6.5            | 4.70E-06 | FBG    |

*Tabella 26: Risultati delle prove Lefranc – Unità FBG.*

### 8.2.2.4 Unità FBG – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità FBG:

- $\gamma = 25-26$  kN/m<sup>3</sup>
- $\sigma_{c\_campione} = 40-50$  MPa
- $E_0 = (69z + 804)$  MPa

### 8.2.3 Unità SAR

#### 8.2.3.1 Identificazione

Alternanza di arenarie grigie in strati da sottili a spessi e di peliti; l'unità si presenta essenzialmente con tre associazioni di facies, non cartografate separatamente, di seguito descritte in ordine di importanza: a) Alternanza tra peliti grigie e arenarie fini e medie, massive, senza evidenti strutture interne, in strati piano paralleli da medi a spessi, a base netta e contatto superiore arenaria/pelite pure netto; rapporto arenaria/pelite=1; b) Alternanze di peliti e arenarie fini in strati da sottili a medi, massivi o con laminazioni da parallele a oblique; c) Arenarie medie e fini amalgamate, in strati e banchi spessi fino a 7-8 metri, con gradazione assente o poco sviluppata e superfici di stratificazione nette, parallele o leggermente convergenti alla scala dell'affioramento.

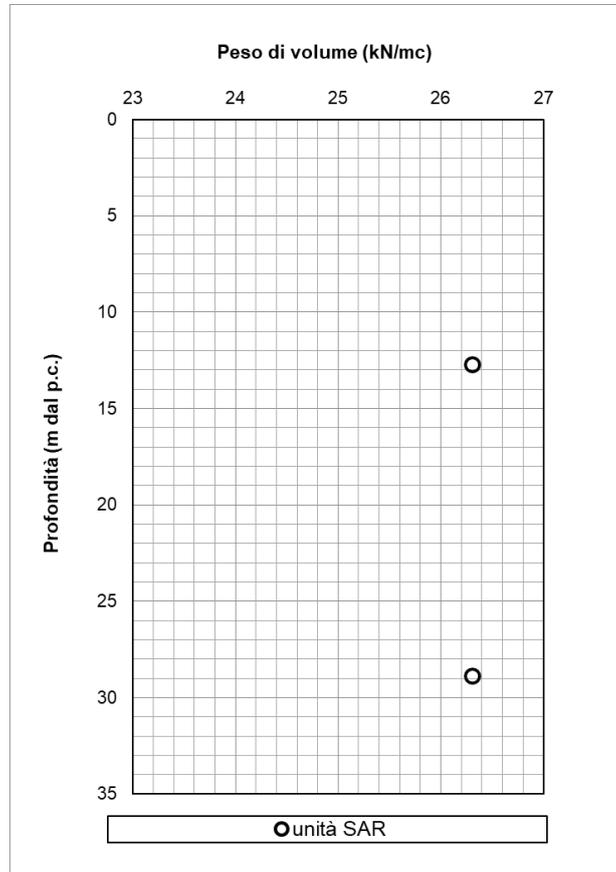


Figura 83: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S24 – Unità SAR.

Per l'unità geotecnica in esame sono stati prelevati 2 campioni su cui sono state eseguite le seguenti determinazioni di laboratorio:

| sondaggio | Campioni | Prof. media (m) | $\gamma$ | unità geotecnica | Misure di velocità sonica | Compressione Monoassiale | Trazione diretta | Point Load Test |
|-----------|----------|-----------------|----------|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------|-----------------|
| S24IV     | CR2      | 12.70           | X        | SAR              | X                         | X                        | X                |                 |
| S24IV     | CR3      | 28.85           | X        | SAR              |                           | X                        |                  |                 |

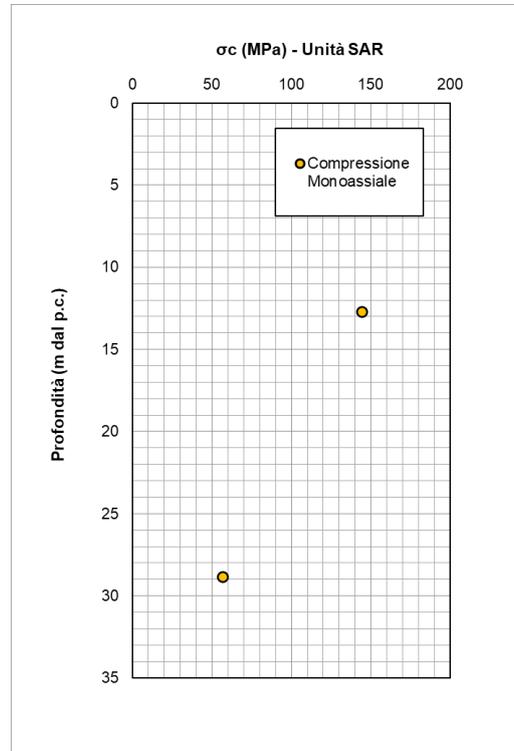
Il peso dell'unità di volume è risultato pari a 26 kN/m<sup>3</sup>.



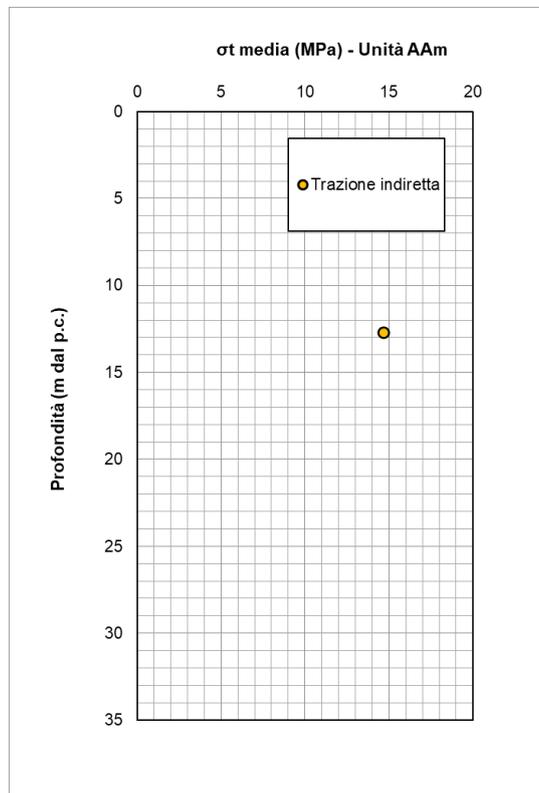
**Figura 84: Peso dell'unità di volume ( $\gamma$ ) – Unità SAR.**

### 9.1.2.2 Parametri di resistenza

Per tale unità sono state eseguite prove volte a determinare la resistenza a compressione e a trazione. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.



*Figura 85: Resistenza a compressione  $\sigma_c$  al variare della profondità da p.c. – Unità SAR.*



*Figura 86: Resistenza a trazione  $\sigma_t$  al variare della profondità da p.c. – Unità SAR.*

In generale, l'unità SAR è caratterizzata da una resistenza a compressione compresa tra circa 50 e 150 MPa e da una a trazione pari a circa 15 MPa.

### 8.2.3.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati delle prove di laboratorio e delle indagini sismiche (MASW), i cui risultati sono sintetizzati nella che segue. Facendo riferimento maggiormente alle prove geofisiche, mediante le quale si riesce a studiare il comportamento deformativo dell'unità in macroscale, si osserva che la rigidità del materiale può essere descritta mediante un'espressione lineare con la profondità:

$$E_0 = (69z + 118) \text{ MPa}$$

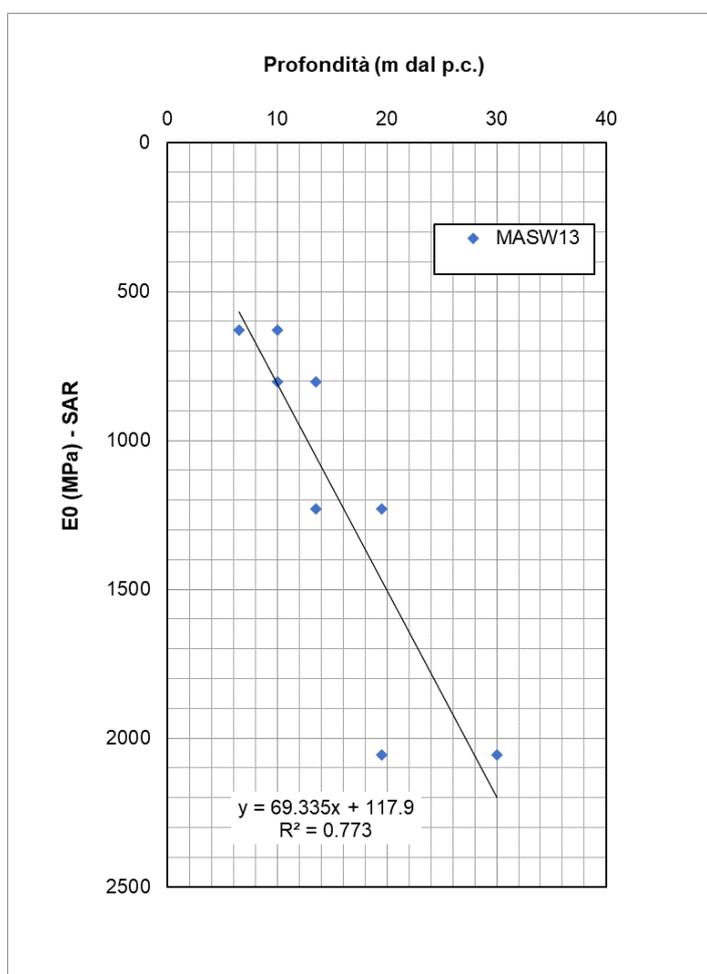
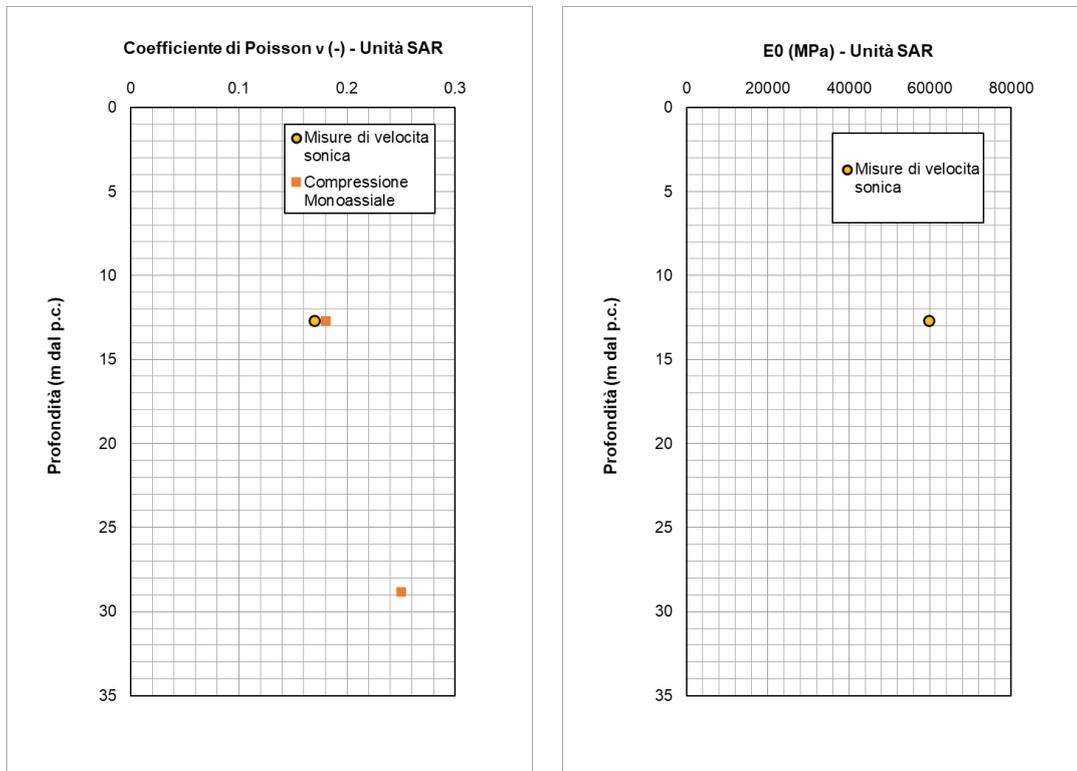
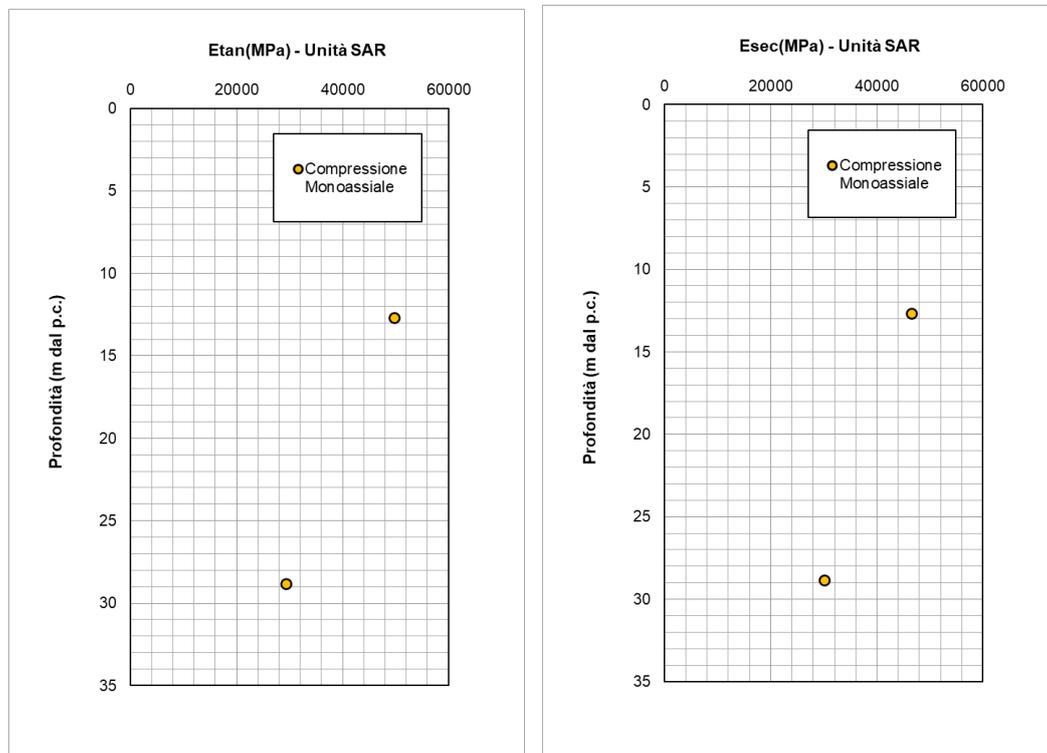


Figura 87: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. da indagini geofisiche – Unità SAR.



**Figura 88: Modulo dinamico  $E_0$  e coefficiente di Poisson  $\nu$  (-) variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità SAR.**



**Figura 89: Modulo tangente  $E_{tan}$  e modulo secante  $E_{sec}$  al variare della profondità da p.c. da prove di laboratorio – Unità SAR.**

### 8.2.3.3 Unità SAR – Sintesi parametri geotecnici di progetto

Di seguito si sintetizzano i valori di riferimento dei parametri meccanici dell'unità desunti dalla caratterizzazione generale dell'unità SAR:

- $\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
- $\sigma_c = 50\text{-}150 \text{ MPa}$
- $E_0 = (69z + 118) \text{ MPa}$

## 8.2.4 Unità C

### 8.2.4.1 Identificazione

L'unità è costituita da calcari e calcari marnosi grigio-scuro, tendenti al bluastro, in strati di 20-100 cm, ben suddivisi da marne e argilliti, spesso gradati, con probabile deposizione secondo correnti di torbidità distali. Frequenti le tracce di bioturbazione, poi fortemente compattate dalla diagenesi. La selce, scura, può comparire in lenti, liste e noduli, talora molto abbondanti. Accanto alla litofacies tipica si può aggiungere una facies a breccie e megabreccie (MOTa), localmente dolomitizzate, con clasti extraformazionali derivanti dallo smantellamento delle sottostanti unità retiche ed heftangiane (Morterone: Jadoul & Doniselli, 1987, M. Tesoro: Jadoul et alii, 2000) e a torbiditi distali fortemente silicizzate, spongolitiche, presenti soprattutto nella parte basale della formazione.



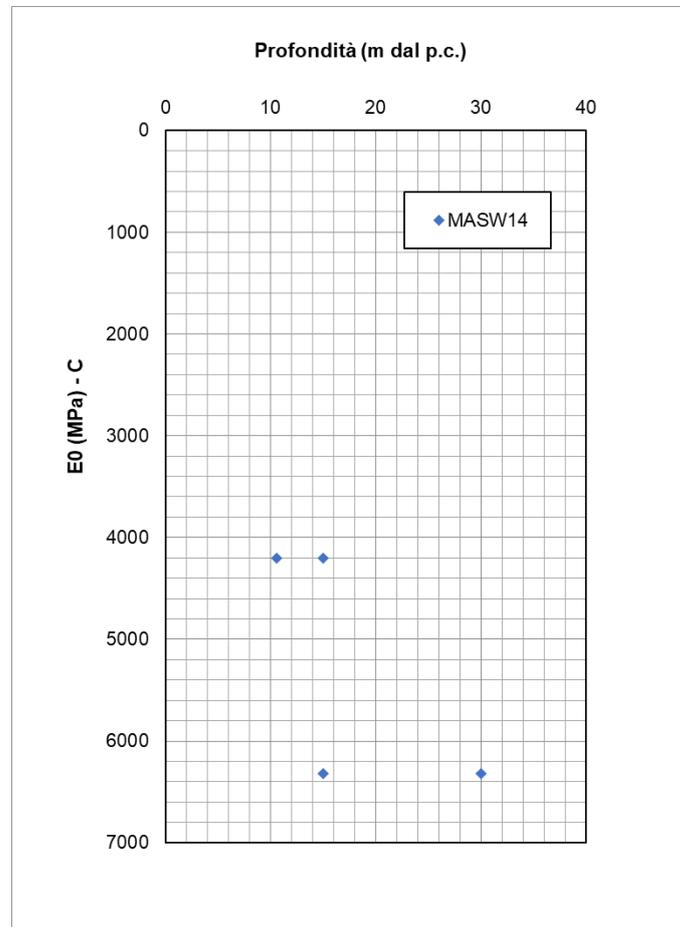
*Figura 90: Foto del materiale in cassetta del sondaggio S25 – Unità C.*

Per l'unità geotecnica in esame non sono stati prelevati campioni, pertanto, i parametri fisici vengono assegnati traendo spunto da dati bibliografici per rocce di simile natura:

➤  $\gamma = 24-26 \text{ kN/m}^3$

### 8.2.4.2 Parametri di deformabilità

I parametri di deformabilità sono stati stimati a partire dai risultati e delle indagini sismiche (MASW), i cui risultati sono sintetizzati nella che segue. Dall'analisi dei risultati si osserva che la rigidità del materiale in termini di  $E_0$  è compresa tra circa 4200 e 6300 MPa.



*Figura 91: Modulo dinamico  $E_0$  variare della profondità da p.c. da indagini geofisiche – Unità C.*

#### 8.2.4.3 Permeabilità

La permeabilità dell'unità geotecnica è stata stimata mediante num. 1 prove Lefranc i cui risultati sono stati riportati nella seguente tabella. La permeabilità misurata è pari a  $6.8 \times 10^{-5}$  m/s.

| LEFRANC |                |          |        |
|---------|----------------|----------|--------|
| BH      | Profondità (m) | k (m/s)  | UNITA' |
| S25 GA  | 10.5           | 6.80E-05 | C      |

*Tabella 27: Risultati delle prove Lefranc – Unità C.*

### 8.3 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Sulla base dell'analisi dei dati proveniente dalle campagne geognostiche, è stato possibile caratterizzare dal punto di vista geotecnico i materiali. Di seguito si riportano le tabelle di sintesi dei parametri fisico-meccanici.

| Unità geotecnica | Litologia                          | $\gamma$             | $\phi'_k$ | $c'_k$ | $c_{uk}$ | $E_0$                              |
|------------------|------------------------------------|----------------------|-----------|--------|----------|------------------------------------|
|                  |                                    | [kN/m <sup>3</sup> ] | [°]       | [kPa]  | [kPa]    | [MPa]                              |
| <b>R</b>         | Riporto                            | 19-20                | 25-30     | 0      | -        | 80-300                             |
| <b>P</b>         | Limo argilloso                     | 18-19                | -         | -      | 38z+11.5 | 280-350                            |
| <b>Sp</b>        | Sabbia Ghiaia e Limo               | 19-20                | 28-30     | 0      | -        | -                                  |
| <b>B</b>         | Sabbia ghiaiosa e limosa           | 19-20                | 30-35     | 0      | -        | [117(z-10m) + 750]                 |
| <b>CF</b>        | Sabbia con Limo                    | 19-20                | 30-35     | 0      | -        | (39z + 255.6)                      |
| <b>SG</b>        | Sabbia e Ghiaia limosa             | 19-20                | 35-38     | 0      | -        | (48.35z + 352)                     |
| <b>SL</b>        | Sabbia e Limo ghiaiosa e argillosa | 19-20                | 25-30     | 0      | -        | (29.5z + 232)                      |
| <b>L</b>         | Limo argilloso                     | 20                   | -         | -      | 50-150   | 220 per z < 20m<br>420 per z > 20m |

*Tabella 28: Parametri fisico-meccanici dei terreni.*

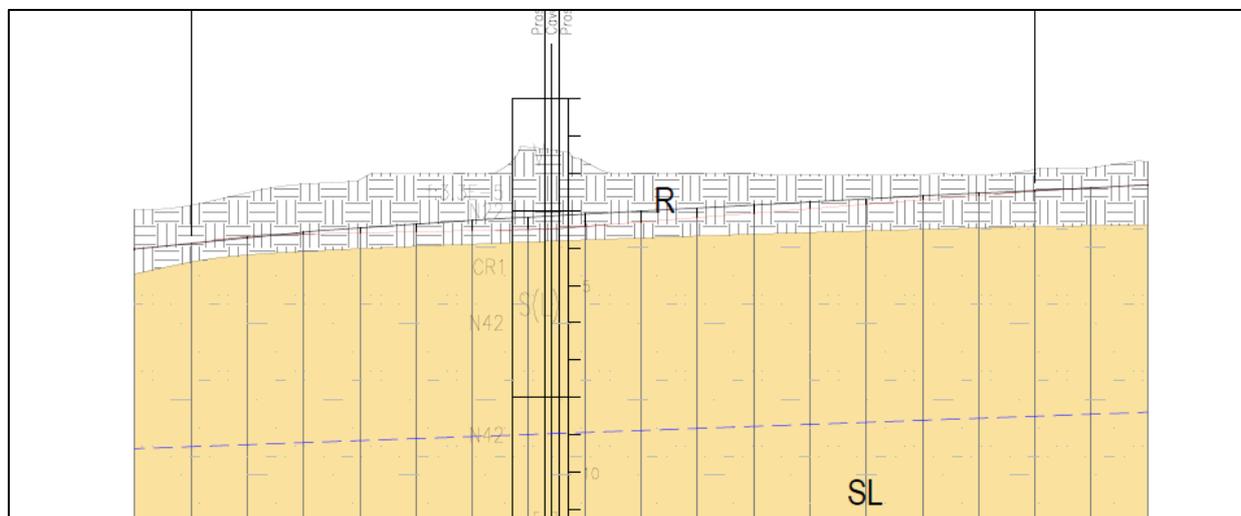
| Unità geotecnica | Ammasso roccioso        | $\gamma$             | $\sigma_c$ campione | $E_0$     |
|------------------|-------------------------|----------------------|---------------------|-----------|
|                  |                         | [kN/m <sup>3</sup> ] | [MPa]               | [MPa]     |
| <b>AM</b>        | Argille marnoso-siltose | 24-25                | 10-50               | 191z      |
| <b>FBG</b>       | Arenarie                | 25-26                | 40-50               | 69z + 804 |
| <b>SAR</b>       | Arenarie                | 26                   | 50-150              | 69z + 118 |
| <b>C</b>         | Calcari                 | 24-26                | -                   | 4200-6300 |

*Tabella 29: Parametri fisico-meccanici delle rocce.*



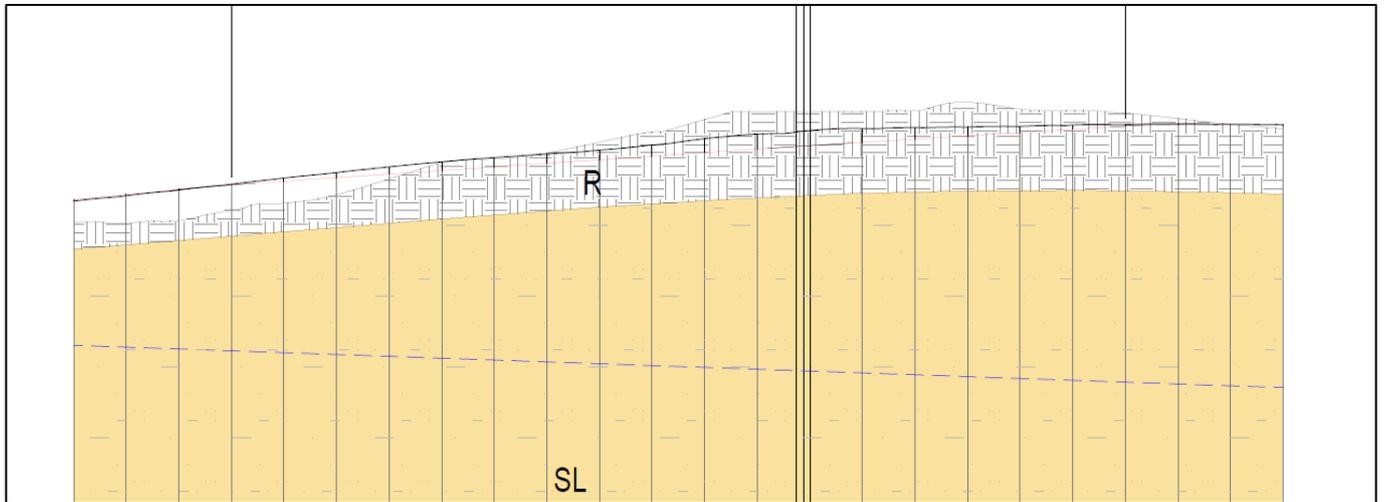
**8.4.2 TR06 - Cavalcavia Brianne - Km 16+271**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>R</b>         | 0.5 - 1                              |
| <b>SL</b>        | 10 - 12                              |



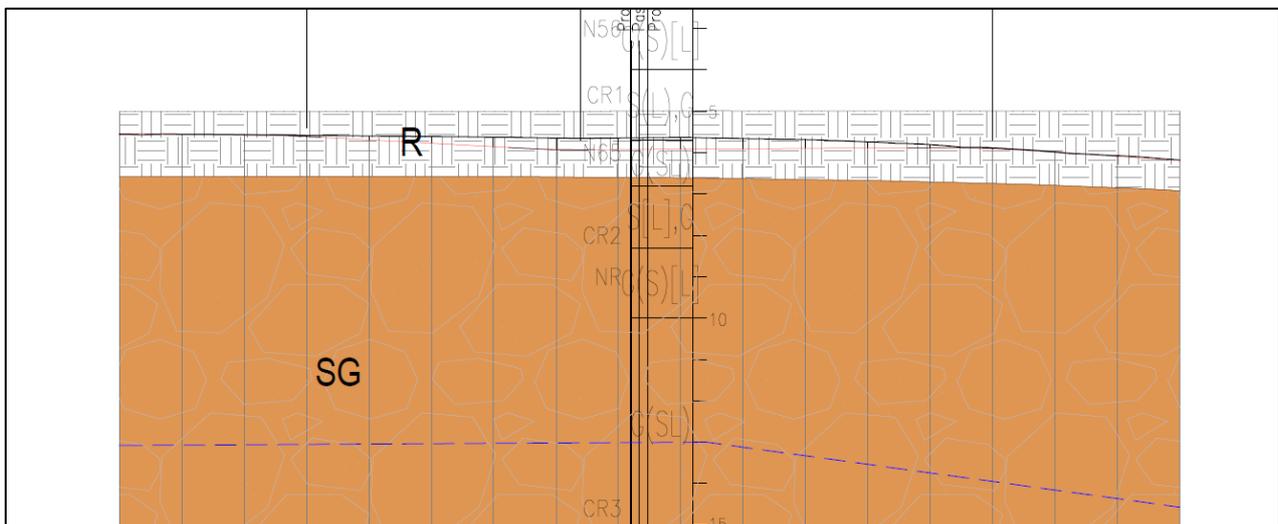
**8.4.3 TR07 - Passerella - Km 17+584**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>R</b>         | 0.5 - 2                              |
| <b>SL</b>        | 9 - 14                               |



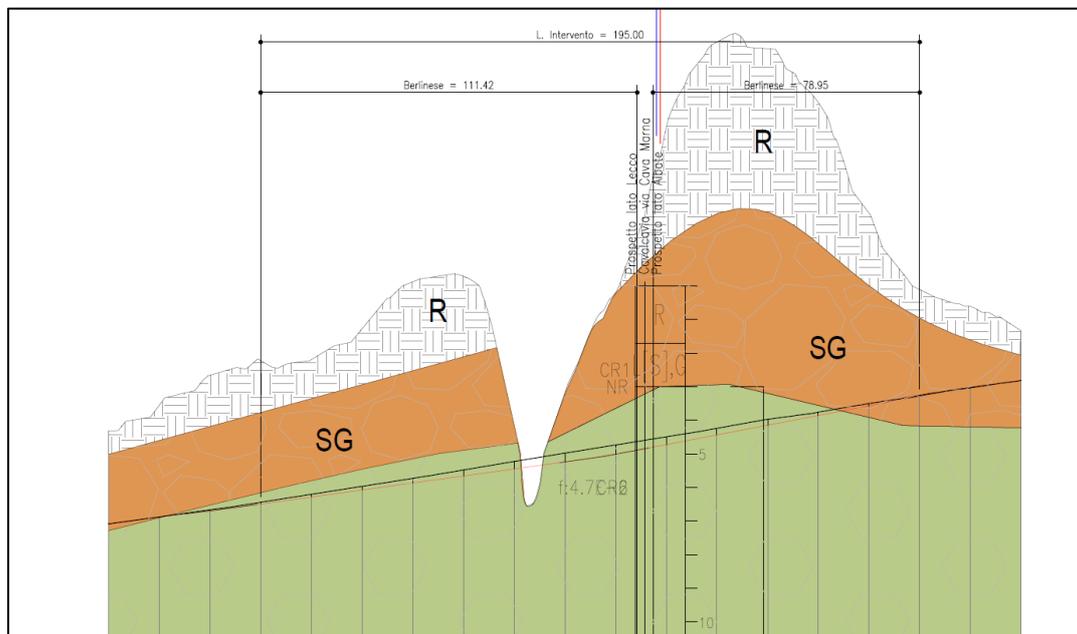
**8.4.4 TR08 - Passerella Via Crispi - Km 18+612**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>R</b>         | 1                                    |
| <b>SG</b>        | 8.5 - 10                             |



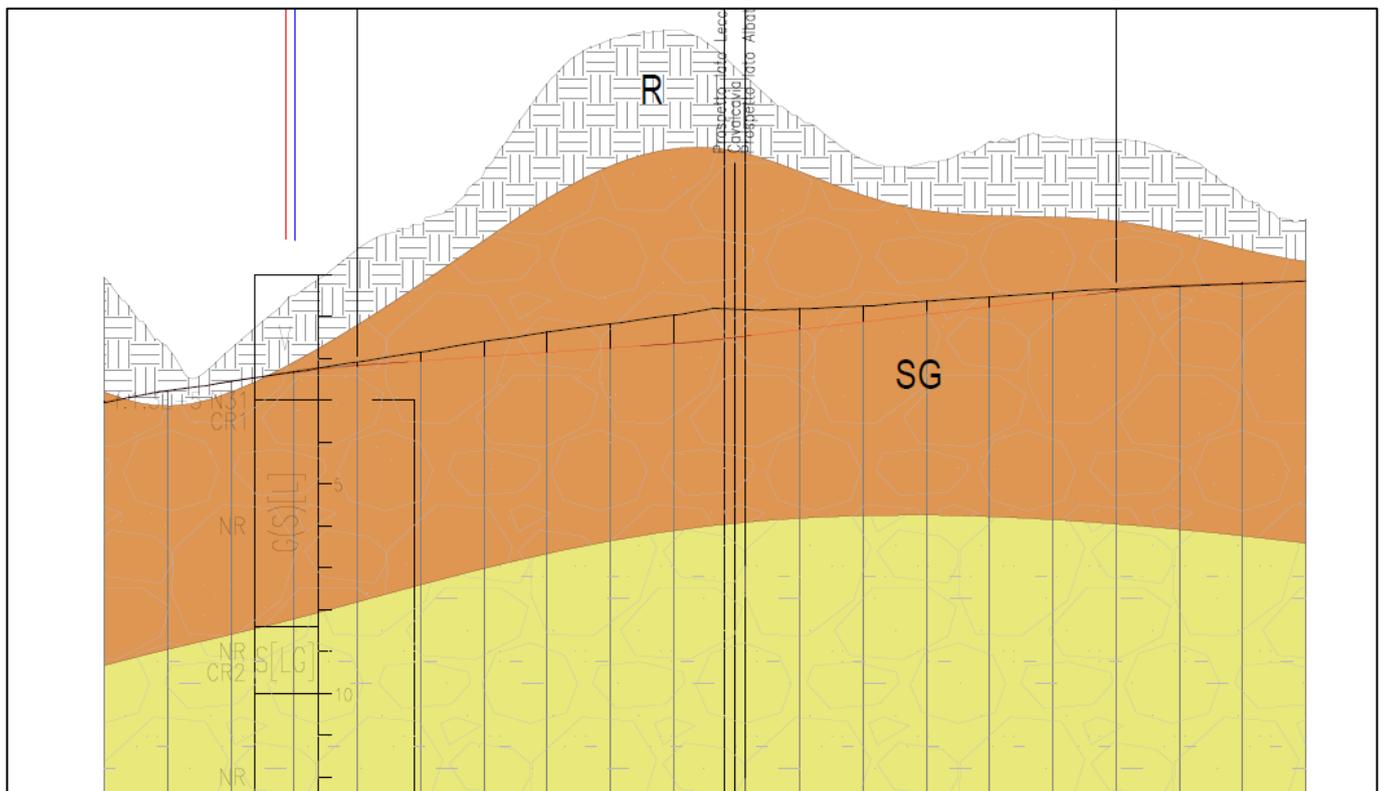
**8.4.5 TR09 - Cavalcavia Cava Marma - Km 20+686**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>SG</b>        | 0 – 1.5                              |
| <b>FBG</b>       | 30                                   |



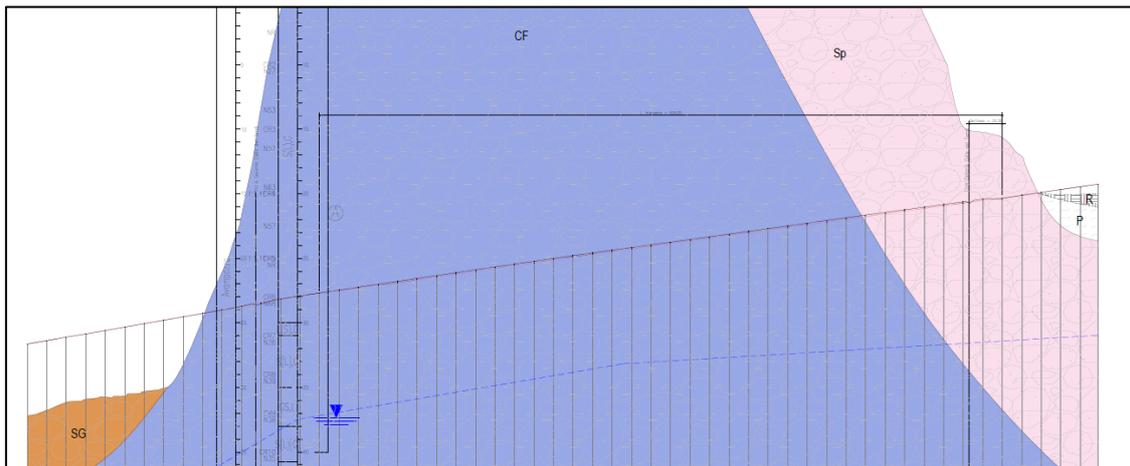
**8.4.6 TR10 - Cavalcavia "Punt de Ceser" - Km 25+688**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>SG</b>        | 5 - 6                                |
| <b>B</b>         | 30                                   |



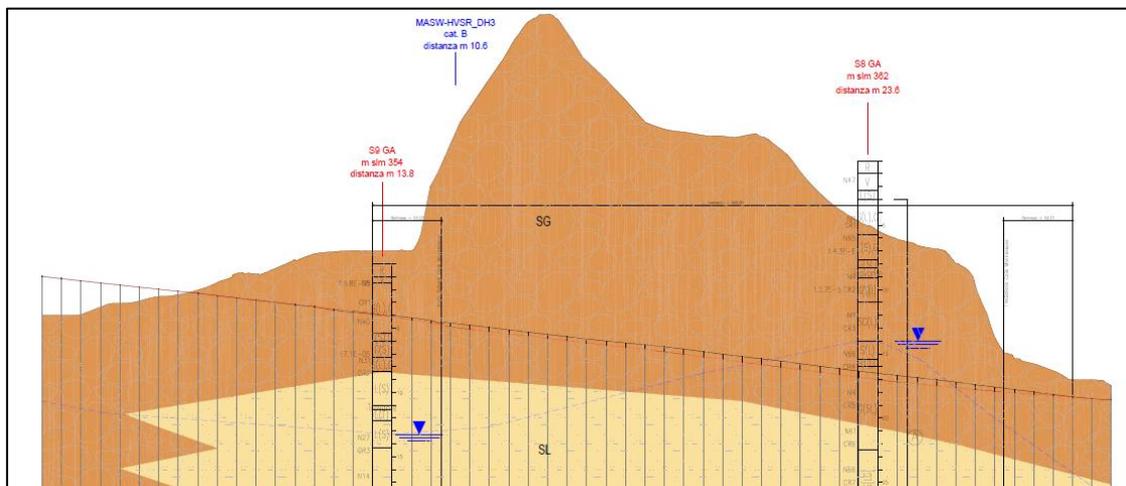
**8.4.7 TR11 - Galleria Colle del Terrò - Km 26+480 - Km 27+029**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>SG</b>        | 0 - 7                                |
| <b>CF</b>        | 30                                   |
| <b>Sp</b>        | 0 - 20                               |
| <b>R</b>         | 0 - 1                                |
| <b>P</b>         | 0 - 2.5                              |



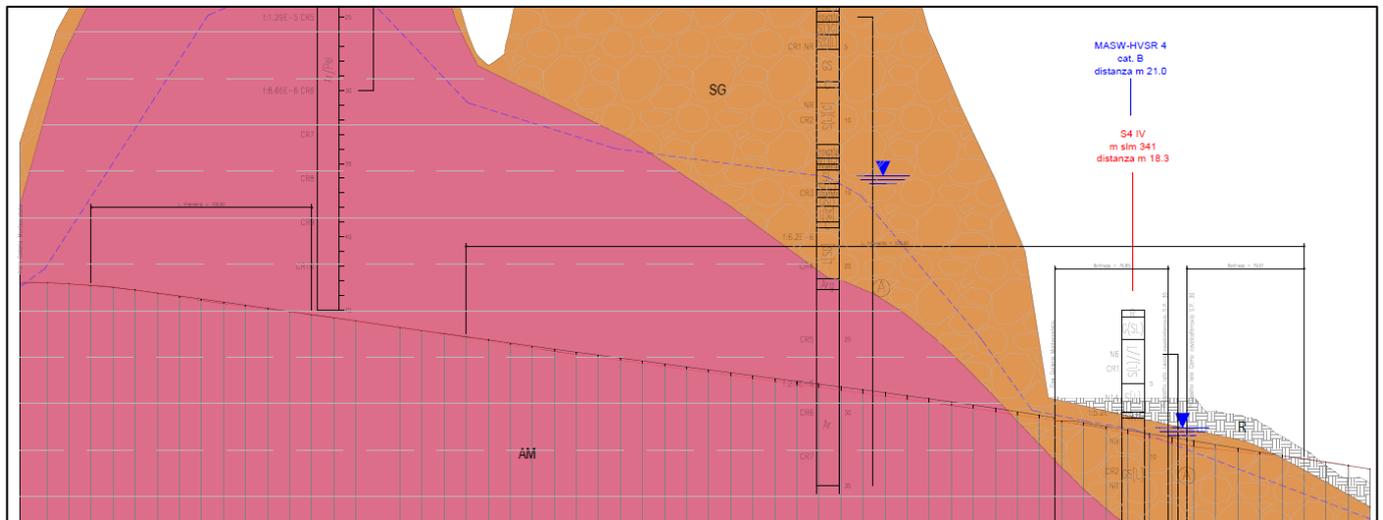
**8.4.8 TR12 - Galleria Colle Montressone - Km 29+810 - Km 30+243**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| SG               | 3.5 - 30                             |
| SL               | 0 - 13.5                             |



**8.4.9 TR13 - Galleria Montecastello e S.P. 36 - Km 31+489 - Km 32+193**

| Unità geotecnica | Spessore al di sotto dell'intervento |
|------------------|--------------------------------------|
|                  | [m]                                  |
| <b>AM</b>        | 30                                   |
| <b>SG</b>        | 0 - 7                                |
| <b>R</b>         | 0 - 1.5                              |





## **9 ANALISI DI PERICOLOSITA' RISPETTO AL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE**

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa qualora si manifesti una delle seguenti circostanze:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero minori di 0.1 g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{cIN} > 180$  dove  $(N_1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e  $q_{cIN}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve che delimitano il campo di suscettibilità, fornite nelle NTC2018.

Quando la condizione 1 non risulti soddisfatta, le indagini geotecniche devono essere finalizzate almeno alla determinazione dei parametri necessari per la verifica delle condizioni 2, 3 e 4.

Come riportato in Tabella 16, le accelerazioni massime allo stato limite SLV risultano sempre inferiori al valore soglia 0.1 g; pertanto, la verifica di liquefazione può essere omessa.