






**INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA  
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)**



**PROGETTO DEFINITIVO**

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| Elaborato   | Nome Elaborato:                        | Scala:     |
| <b>ET06</b> | <b>RELAZIONE GEOTECNICA CORPO DIGA</b> | -          |
|             |  | Data:      |
|             |  | 27/12/2019 |

|   |   |
|---|---|
| Settore:<br> Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488<br><small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>  |   |
| <b>PROGETTAZIONE :</b><br><b>PROGETTISTA - PROJECT MANAGER :</b> ING. GIOVANNI SIMONELLI<br><b>GEOLOGO:</b> DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI<br><b>ESPROPRI:</b> GEOM. ANDREA PATRIARCHI   | <b>COLLABORATORI :</b><br>DOTT. GEOL. CARLO FERRI<br>GEOM. MATTEO MASI  |
| <b>CONSULENTI TECNICI :</b><br> ING. DAVID SETTESOLDI<br> DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI<br> ING. GIOVANNI CANNATA | <b>COMMESSA I.T. :</b><br>INGT-TPLPD-PBAAC252<br><b>RESPONSABILE COMMITTENTE :</b><br>ING. CRISTIANO AGOSTINI |
| <b>DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANI :</b><br> ING. PAOLO PIZZARI   | <b>RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :</b><br>ING. LEONARDO ROSSI   |

| Rev. | Data       | Descrizione / Motivo della revisione | Redatto | Controllato / Approvato |
|------|------------|--------------------------------------|---------|-------------------------|
| 01   | 27/12/2019 | Prima Emissione                      | Catella | Settesoldi              |

## INDICE

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>PREMESSA .....</b>                               | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>               | <b>4</b>  |
| <b>3</b> | <b>MODELLO GEOTECNICO .....</b>                     | <b>5</b>  |
| <b>4</b> | <b>RIEPILOGO PARAMETRI GEOTECNICI .....</b>         | <b>12</b> |
| <b>5</b> | <b>VERIFICHE GEOTECNICHE DEL CORPO DIGA.....</b>    | <b>13</b> |
| <b>6</b> | <b>VERIFICHE DEGLI STATI ULTIMI IDRAULICI .....</b> | <b>14</b> |

## ELENCO FIGURE

|  |   |
|--|---|
| Figura 3-1 – Planimetria delle indagini geognostiche. ....                 | 6 |
| Figura 3-2 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'500). ....         | 7 |
| Figura 3-3 – Profilo stratigrafico sezione CR_04.....                      | 8 |
| Figura 3-4 – Profilo stratigrafico sezione CR_06.....                      | 8 |
| Figura 3-5 – Profilo stratigrafico sezione CR_08.....                      | 9 |
| Figura 3-6 – Profilo stratigrafico profilo longitudinale coronamento. .... | 9 |

## ELENCO TABELLE

|  |    |
|--|----|
| Tabella 4-1 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA1 del corpo diga. ....                 | 10 |
| Tabella 4-2 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità AL del corpo diga. ....                  | 10 |
| Tabella 4-3 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA2 del corpo diga. ....                 | 10 |
| Tabella 4-4 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità SUB del corpo diga. ....                 | 11 |
| Tabella 4-1 – Parametri geotecnici caratteristici.....   | 12 |
| Tabella 5-1 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza delle dighe di materiali sciolti ai sensi del cap. E.5.1 del D.M. 26/06/2014. .... | 13 |

## 1 PREMESSA

La presente relazione geotecnica è parte integrante del progetto definitivo degli interventi di adeguamento della diga di Giudea a Gello nel Comune di Pistoia (PT).

La relazione geotecnica è redatta in conformità delle normative e raccomandazioni di riferimento elencate al successivo paragrafo.

Nella relazione si riportano le valutazioni ed i calcoli effettuati per la definizione del modello geotecnico di riferimento per il corpo diga e per i terreni del substrato.

## 2 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Tutte le verifiche sono condotte nel rispetto della normativa vigente:

- **Legge n. 64 del 02/02/1974**  
Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche.
- **D.M. LL.PP. del 11/03/1988**  
Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- **D.M. 16 Gennaio 1996**  
Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche.
- **Circolare Ministero LL.PP. 15 Ottobre 1996 N. 252 AA.GG./S.T.C.**  
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche di cui al D.M. 9 Gennaio 1996.
- **Circolare Ministero LL.PP. 10 Aprile 1997 N. 65/AA.GG.**  
Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le costruzioni in zone sismiche di cui al D.M. 16 Gennaio 1996.
- **Norme Tecniche per le Costruzioni 2008 (D.M. 14 Gennaio 2008)**
- **Circolare 617 del 02/02/2009**  
Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- **Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (D.M. 26 Giugno 2014)**
- **Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 17 Gennaio 2018)**
- **Istruzioni MIT DG Dighe Luglio 2019**  
Istruzioni per l'applicazione della normativa tecnica di cui al D.M. 26 Giugno 2014 e al D.M. 17 Gennaio 2018 in merito alle verifiche sismiche delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.
- **Procedura MIT DG Dighe Marzo 2019**  
Procedura per la rivalutazione sismica delle grandi dighe, degli scarichi e delle opere accessorie.
- **Circolare n. 7 del 21/01/2019**  
Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018.

### 3 MODELLO GEOTECNICO

Il modello geotecnico è ricostruito a partire dalla successione geologica delle varie sub-unità, intese come parti omogenee sotto il profilo litologico, che compongono il corpo diga ed i terreni del substrato.

Le indagini geognostiche dirette e indirette hanno permesso di individuare allo stato attuale n. 4 differenti sub-unità:

- sub-unità LA1: corpo diga costituito da limi debolmente argillosi con clasti;
- sub-unità AL: corpo diga formato da argille debolmente limose con clasti;
- sub-unità LA2: corpo diga composto da limi argillosi con clasti;
- sub-unità SUB: substrato corpo diga caratterizzato dalla presenza di argillite con livello marnoso.

Il profilo geotecnico è ricostruito componendo le successioni stratigrafiche individuate con i sondaggi geognostici, con le prospezioni sismiche a rifrazione e di tipo MASW, nonché con le indagini sismiche passive HVSR del 2019. La planimetria delle indagini geognostiche è riportata nella Figura 3-1.

In questo modo sono ricostruiti n. 4 profili stratigrafici dello sbarramento attuale (vedere Figura 3-2):

- sezione CR\_04 trasversale al corpo diga (Figura 3-3);
- sezione CR\_06 trasversale al corpo diga (Figura 3-4);
- sezione CR\_08 trasversale al corpo diga (Figura 3-5);
- sezione lungo l'asse del coronamento dello sbarramento di progetto (Figura 3-6).

Il profilo stratigrafico della sezione CR\_04 è ricostruito a partire da:

- sondaggio S1 (2013);
- sezione sismica SR n.2 (2019);
- MASW 2 (2019);
- HVSR 2 (2019).

Il profilo stratigrafico della sezione CR\_06 è ricostruito a partire da:

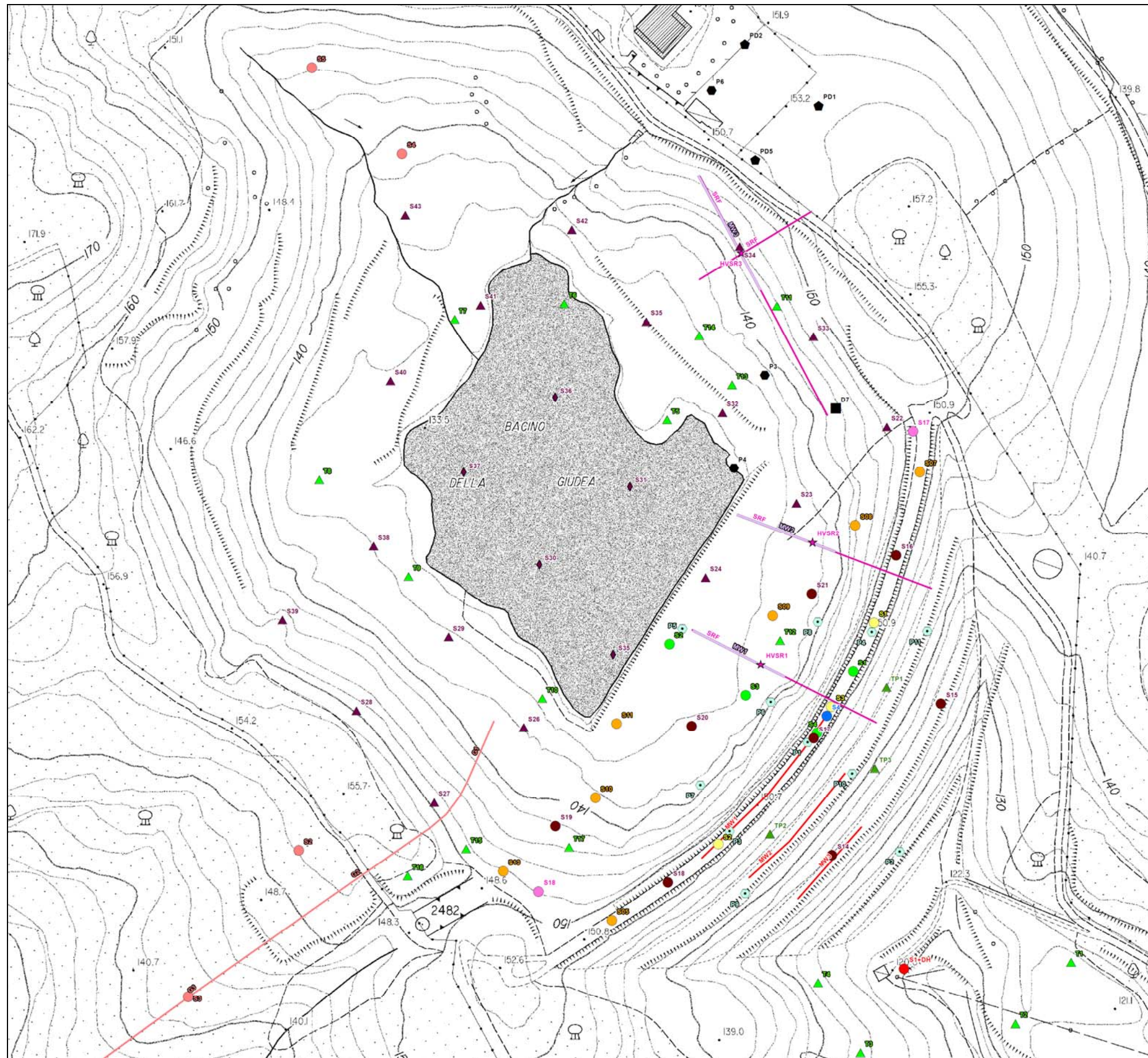
- sondaggi S2 (1991) / S3 (1991) / S3 (2013);
- prove penetrometriche statiche P6 (2012) / P10 (2012);
- sezione sismica SR n.1 (2019);
- MASW 1 (2019);
- HVSR 1 (2019).

Il profilo stratigrafico della sezione CR\_08 è ricostruito a partire da:

- sondaggi S2 (1991) / S3 (1991) / S1 (2007) / S2 (2013);
- prove penetrometriche statiche P6 (2012) / P7 (2012) / P9 (2012);
- sezione sismica SR n.1 (2019);
- MASW 2 (2007) / MASW 3 (2007) / MASW 1 (2019);
- HVSR 1 (2019).

Il profilo stratigrafico della sezione longitudinale al coronamento è ricostruita a partire da

- sondaggi S2 (2013) / S4 (2014) / S17 (2019) / S18 (2019);
- sezione sismica SR n.1 (2019) / SR n.2 (2019);
- MASW 1 (2019) / MASW 2 (2019);
- HVSR 1 (2019) / HVSR 2 (2019).



**Indagini puntuali**

**Sessione 2019**

- Sondaggio
- ◆ Prova penetrometrica (CPT/DIN)
- ★ Sismica Passiva HVSR
- Prova penetrometrica statica (CPT)
- Prova penetrometrica dinamica (DIN)

**Sessione 2018**

- ◆ Punto di campionamento
- Sondaggio
- ▲ Trincea

**Sessione 2014**

- Sondaggio

**Sessione 2013**

- Sondaggio ambientale
- Sondaggio

**Sessione 2012**

- Prova penetrometrica statica (CPT)

**Sessione 2007**

- Sondaggio
- Sondaggio con DownHole (DH)

**Sessione 1991 - 1993**

- ▲ Trincea
- ▲ Trincea con prove di densità
- Sondaggio

**Indagini lineari**

**Sessione 2019**

- Sismica a rifrazione
- Sismica MASW

**Sessione 2007**

- Sismica MASW
- Sismica a rifrazione

Figura 3-1 – Planimetria delle indagini geognostiche.

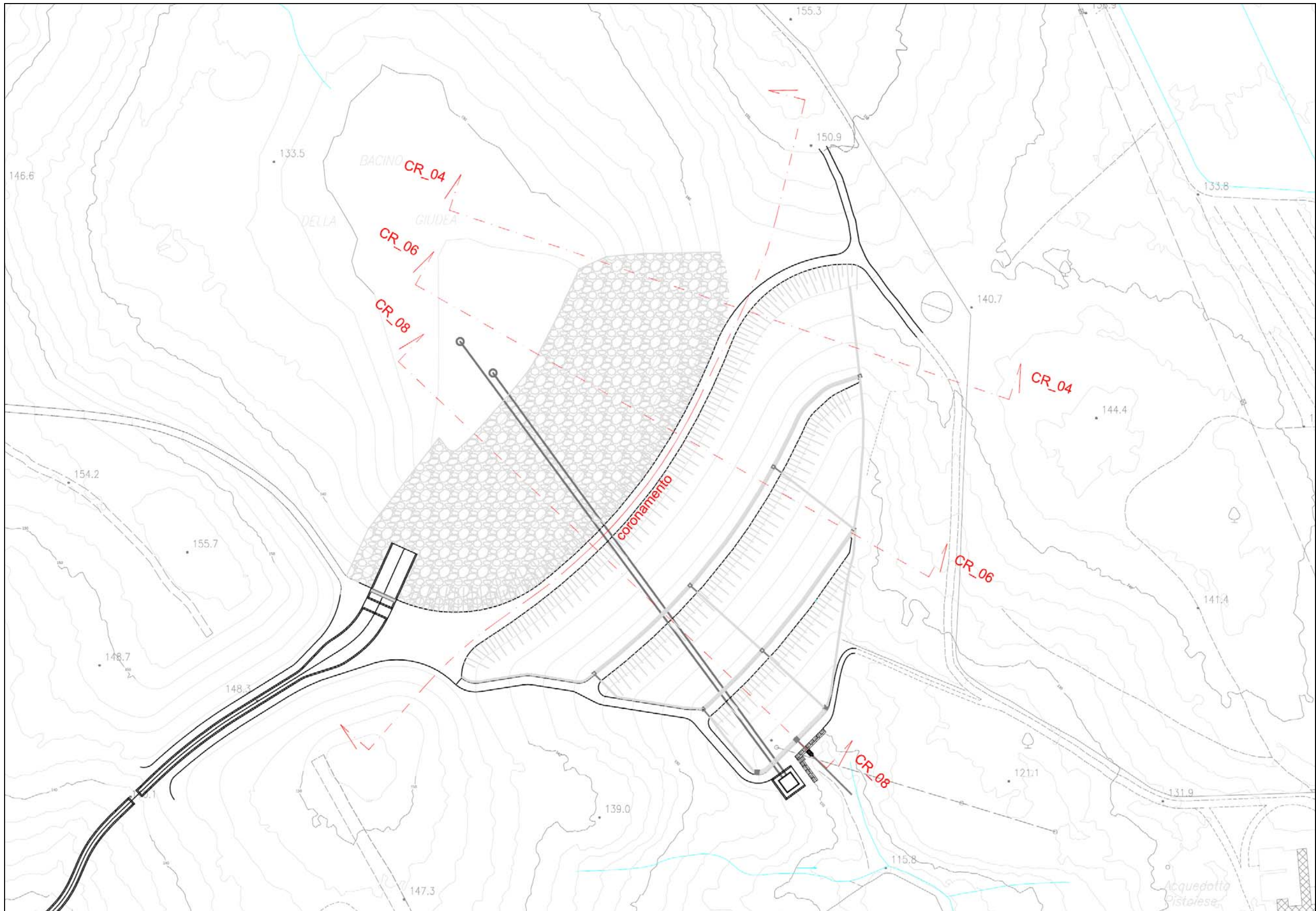


Figura 3-2 – Planimetria sezioni di verifica (scala 1:1'500).



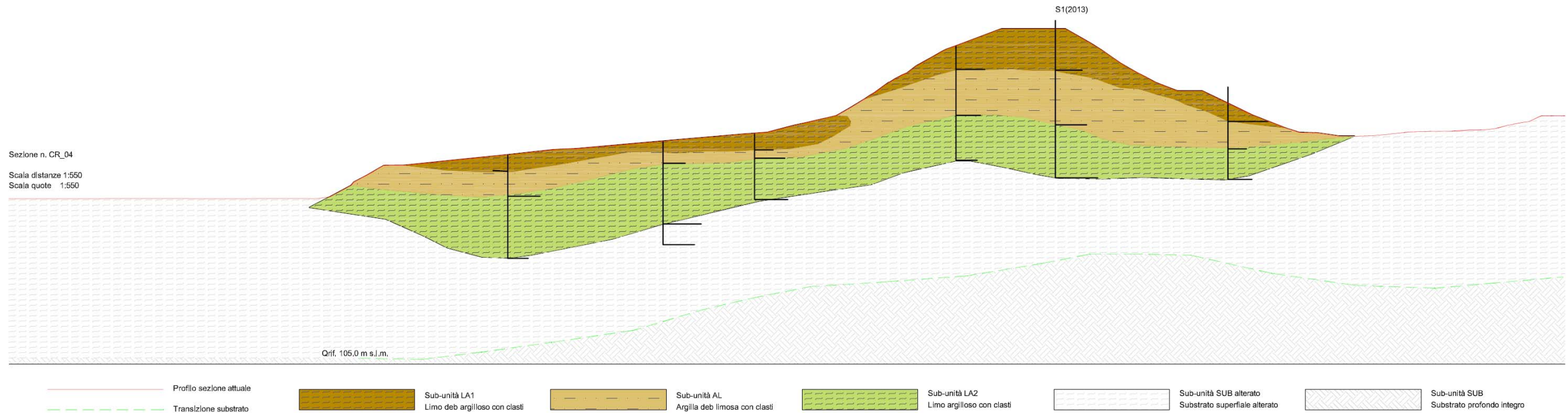


Figura 3-3 – Profilo stratigrafico sezione CR\_04.

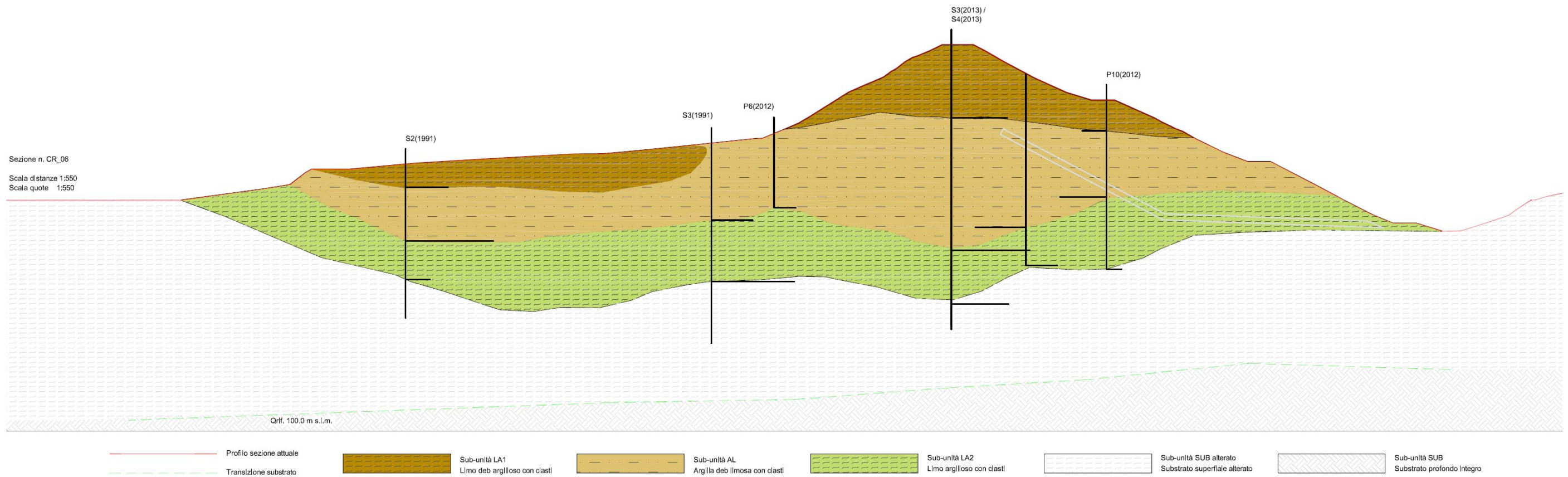


Figura 3-4 – Profilo stratigrafico sezione CR\_06.

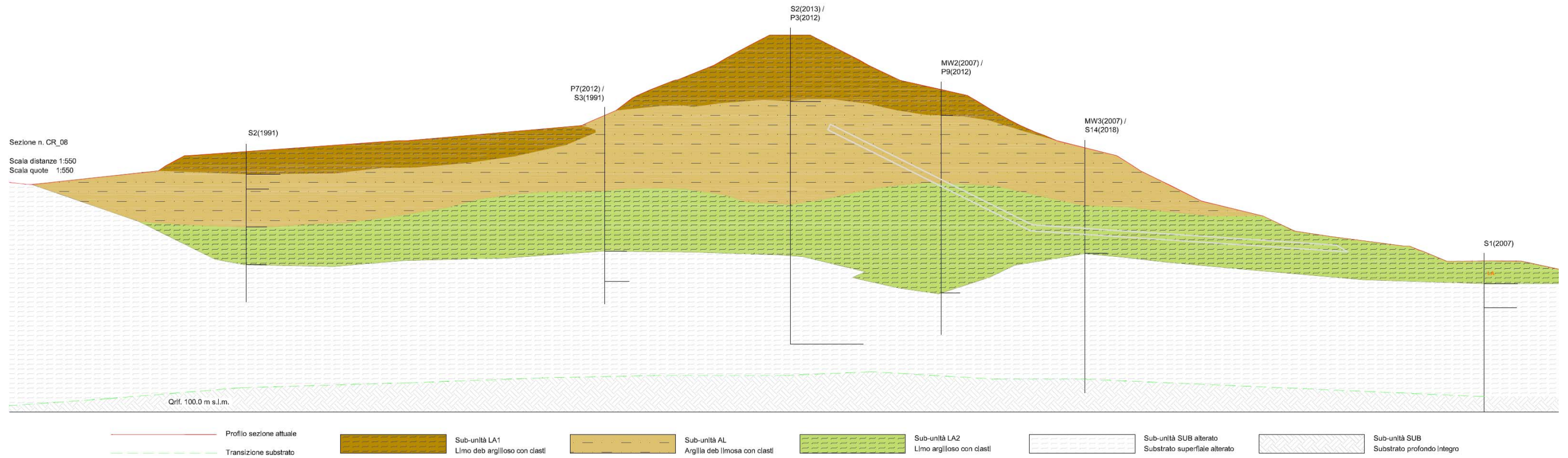


Figura 3-5 – Profilo stratigrafico sezione CR\_08.

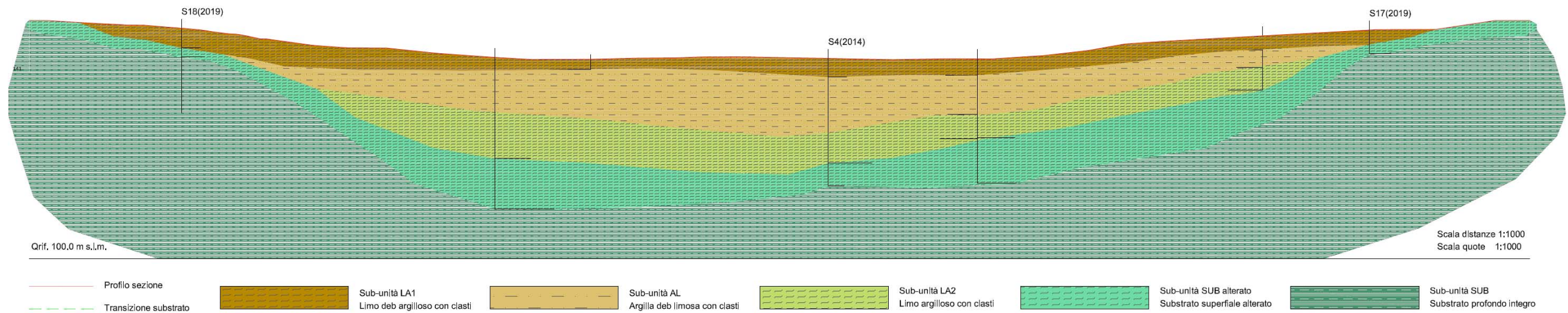


Figura 3-6 – Profilo stratigrafico profilo longitudinale coronamento.

| Nome campione<br>(anno indagine) | Profondità<br>[m] | Permeabilità<br>[m/s] | $\gamma_{sec}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{nat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | n<br>[%] | Phi'<br>[°] | c'<br>[kPa] | Cu<br>[kPa] | Poisson<br>[%] | Modulo di Young<br>[Mpa] | Modulo di Taglio<br>[Mpa] | Modulo di Bulk<br>[Mpa] | Contenuto d'acqua<br>(wN) | Limite di liquidità<br>(WL) | Limite di plasticità<br>(WL) | Indice di plasticità<br>(WL) | Ghiaia<br>[%] | Sabbia<br>[%] | Limo<br>[%] | Argilla<br>[%] |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|--|--|--|----------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| S1C1(1991)                       | -2,8/-3,10        | 1.00E-07              |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 24                        | 30                          | 21                           | 9                            |               |               |             |                |
| S4C1R(1991)                      | -1,5/-1,7         |                       |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 17                        | 42                          | 20                           | 22                           |               |               |             |                |
| S4C1(1991)                       | -3,3/-3,6         |                       |  | 19,8                                   | 27,1                                   |          | 1 provino   | 30          |             |                |                          |                           |                         | 23                        | 49                          | 22                           | 27                           |               |               |             |                |
| S4C2R(1991)                      | -4,2/-4,4         | 1.00E-07              |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 22                        | 44                          | 22                           | 22                           |               |               |             |                |
| S3C1(2013)                       | -9                |                       |  | 21,09                                  |  |          | 21,6        | 24          | 74          |                |                          |                           |                         | 18,4                      | 36                          | 23                           | 13                           | 16,71         | 24,18         | 33,29       | 25,82          |

Tabella 4-1 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA1 del corpo diga.

| Nome campione<br>(anno indagine) | Profondità<br>[m] | Permeabilità<br>[m/s] | $\gamma_{sec}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{nat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | n<br>[%] | Phi'<br>[°] | c'<br>[kPa] | Cu<br>[kPa] | Poisson<br>[%] | Modulo di Young<br>[Mpa] | Modulo di Taglio<br>[Mpa] | Modulo di Bulk<br>[Mpa] | Contenuto d'acqua<br>(wN) | Limite di liquidità<br>(WL) | Limite di plasticità<br>(WL) | Indice di plasticità<br>(WL) | Ghiaia<br>[%] | Sabbia<br>[%] | Limo<br>[%] | Argilla<br>[%] |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|--|--|--|----------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| S1C2(1991)                       | -7,3/-7,6         | 1.00E-07              |  |  | 20,7                                   |          | 1 provino   | 40          |             |                |                          |                           |                         | 19                        | 42                          | 20                           | 22                           |               |               |             |                |
| S1C3(1991)                       | -12,6/-12,9       | 1.00E-07              |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 18                        | 41                          | 19                           | 22                           | 36            | 9             |             | 55             |
| S1C4(1991)                       | -16,1/-16,5       |                       |  | 16,8                                   | 20,3                                   |          | 19          | 30          |             |                |                          |                           |                         | 21                        | 55                          | 21                           | 34                           | 16            | 7             |             | 77             |
| S2C1(1991)                       | -6,4/-6,7         | 1.00E-07              |  | 16,6                                   | 20,1                                   |          | 25          | 30          |             |                |                          |                           |                         | 18                        | 42                          | 21                           | 21                           | 30            | 6             |             | 64             |
| S3C2(1991)                       | -8,6/-8,9         | 1.00E-07              |  | 16,7                                   | 20,2                                   |          | 19          | 25          |             |                |                          |                           |                         | 21                        | 45                          | 22                           | 23                           |               |               |             |                |
| S3C3(1991)                       | -12,4/ -12,7      |                       |  | 16,4                                   | 20,3                                   |          | 31          | 0           |             |                |                          |                           |                         | 20                        | 52                          | 21                           | 31                           | 31            | 12            |             | 57             |
| S4C2(1991)                       | -7/-7,3           |                       |  |  | 20                                     |          | 1 provino   | 40          |             |                |                          |                           |                         | 23                        | 50                          | 21                           | 29                           |               |               |             |                |
| S4C3R(1991)                      | 6,4/-6,6          | 1.00E-06              |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 19                        | 41                          | 21                           | 20                           |               |               |             |                |
| S4C3(1991)                       | 13,5/-13,85       | 1.00E-07              |  | 21                                     |  |          | 15          | 50          |             |                |                          |                           |                         | 17                        | 42                          | 19                           | 23                           |               |               |             |                |
| S1C1(2013)                       | -9                |                       |  | 21,38                                  |  |          | 23          | 7           | 55          |                |                          |                           |                         | 19,79                     | 40                          | 24                           | 16                           | 5,45          | 9,05          | 52,46       | 33,04          |
| S2C1(2013)                       | -9                |                       |  | 21,48                                  |  |          | 27,7        | 18          | 77          |                |                          |                           |                         | 12,07                     | 33                          | 21                           | 12                           | 10,56         | 13,88         | 51,68       | 23,88          |
| S2C2(2013)                       | -15               |                       |  | 20,79                                  |  |          | 30          | 0           | 92          |                |                          |                           |                         | 18,82                     | 37                          | 22                           | 15                           | 17,1          | 26,49         | 32,5        | 23,91          |
| S2C3(2013)                       | -22               |                       |  | 20,69                                  |  |          | 29,4        | 0           | 78          |                |                          |                           |                         | 20,81                     | 35                          | 21                           | 14                           | 14,14         | 6,87          | 55,26       | 23,73          |
| S3C2(2013)                       | -15               |                       |  | 19,42                                  |  |          | 20,9        | 20          | 34          |                |                          |                           |                         | 17,92                     | 36                          | 23                           | 13                           | 9,69          | 22,49         | 50,27       | 17,55          |
| S3C3(2013)                       | -22,5             |                       |  | 20,5                                   |  |          | 26,2        | 29          | 37          |                |                          |                           |                         | 19,67                     | 41                          | 22                           | 19                           | 16,59         | 21,99         | 37          | 24,42          |
| S3C4(2013)                       | -25,5             |                       |  | 20,5                                   |  |          | 23,6        | 7           |             |                |                          |                           |                         | 20,81                     | 46                          | 25                           | 21                           | 9,29          | 16,37         | 44,08       | 30,26          |

Tabella 4-2 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità AL del corpo diga.

| Nome campione<br>(anno indagine) | Profondità<br>[m] | Permeabilità<br>[m/s] | $\gamma_{sec}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{nat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | n<br>[%] | Phi'<br>[°] | c'<br>[kPa] | Cu<br>[kPa] | Poisson<br>[%] | Modulo di Young<br>[Mpa] | Modulo di Taglio<br>[Mpa] | Modulo di Bulk<br>[Mpa] | Contenuto d'acqua<br>(wN) | Limite di liquidità<br>(WL) | Limite di plasticità<br>(WL) | Indice di plasticità<br>(WL) | Ghiaia<br>[%] | Sabbia<br>[%] | Limo<br>[%] | Argilla<br>[%] |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|--|--|--|----------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| S4C4(1991)                       | 17,8/-18,3        |                       |  |  |  |          | 15          |             |             |                |                          |                           |                         | 22                        | 44                          | 21                           | 23                           | 39            | 11            |             | 50             |
| S4C5(1991)                       | -21/-21,35        | 1.00E-08              |  | 16,4                                   | 21                                     |          | 31          | 0           |             |                |                          |                           |                         | 16                        | 43                          | 20                           | 23                           |               |               |             |                |
| DH(2007)                         | p.c./-6           |                       |  |  |  |          |             |             |             | 0,44           | 437                      | 147                       | 1274                    |                           |                             |                              |                              |               |               |             |                |
| S1C1(2007)                       | -4/-4,4           |                       | 18,66                                  | 21,2                                   | 26,87                                  | 30,4     | 25,75       | 3,2         | 5,2         |                |                          |                           |                         | 13,5                      | 35                          | 18                           | 17                           | 8             | 26            | 32          | 34             |
| S1C2(2013)                       | -15               |                       |  | 20,79                                  |  |          | 20,4        | 22          | 73          |                |                          |                           |                         | 17,8                      | 35                          | 22                           | 13                           | 8,09          | 15,94         | 55,85       | 20,12          |
| S2C4(2013)                       | -25,5             |                       |  | 21,28                                  |  |          | 24,9        | 7           |             |                |                          |                           |                         | 16,08                     | 31                          | 18                           | 13                           | 15,76         | 28,03         | 38,27       | 17,94          |

Tabella 4-3 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA2 del corpo diga.

| Nome campione<br>(anno indagine) | Profondità<br>[m] | Permeabilità<br>[m/s] | $\gamma_{sec}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{nat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | n<br>[%] | Phi'<br>[°] | c'<br>[kPa] | Cu<br>[kPa] | Poisson<br>[%] | Modulo di Young<br>[Mpa] | Modulo di Taglio<br>[Mpa] | Modulo di Bulk<br>[Mpa] | Contenuto d'acqua<br>(wN) | Limite di liquidità<br>(WL) | Limite di plasticità<br>(WL) | Indice di plasticità<br>(WL) | Ghiaia<br>[%] | Sabbia<br>[%] | Limo<br>[%] | Argilla<br>[%] |  |
|----------------------------------|-------------------|-----------------------|--|--|--|----------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|--|
| DH(2007)                         | -6/-18            |                       |  |  |  |          |             |             |             | 0.48           | 1774                     | 599                       | 12122                   |                           |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| DH(2007)                         | -18/-30           |                       |  |  |  |          |             |             |             | 0.45           | 4294                     | 1477                      | 15708                   |                           |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| S1C2(2007)                       | -14               |                       | 19.92                                  | 22.29                                  | 26.87                                  | 25.9     |             |             |             |                |                          |                           |                         | 11.9                      |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| S1C3(2007)                       | -19,5             |                       | 18.92                                  | 21.37                                  | 26.87                                  | 29.57    | 27          | 25.49       |             |                |                          |                           |                         | 13                        | 35                          | 18                           | 17                           | 5             | 45            | 33          | 17             |  |
| S1C4(2007)                       | -22,7             |                       | 18.6                                   | 21.25                                  | 26.87                                  | 35.16    | 22.5        | 59.2        |             |                |                          |                           |                         | 14                        |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| S1C5(2007)                       | -28,4             |                       |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         |                           |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| S2C1(2007)                       | -3,2/-3,6         |                       | 15.68                                  | 20.09                                  | 26.87                                  | 41.63    | 29.5        | 3.6         |             |                |                          |                           |                         | 28.16                     | 37                          | 19                           | 18                           | 17            | 28            | 37          | 18             |  |
| S3C1(2007)                       | -3,6/-4           |                       |  |  |  |          |             |             |             |                |                          |                           |                         |                           | 37                          | 19                           | 18                           | 4             | 18            | 42          | 36             |  |
| S3C2(2007)                       | -11,3/-11,7       |                       | 19                                     | 21                                     | 28.67                                  | 29.1     |             |             |             |                |                          |                           |                         | 10                        |                             |                              |                              |               |               |             |                |  |
| S1C3(2013)                       | -22.5             |                       |  | 20.3                                   |  |          | 22          | 8           | 33          |                |                          |                           |                         | 13.05                     | 37                          | 21                           | 16                           | 16.62         | 12.88         | 49.13       | 21.37          |  |
| S1C4(2013)                       | -25.5             |                       |  | 23.63                                  |  |          | 23.9        | 0           |             |                |                          |                           |                         | 8.04                      | 33                          | 20                           | 13                           | 25.74         | 23.13         | 29.73       | 21.4           |  |
| S4C7(2014)                       | -34               |                       |  |  |  |          | 24.4        | 22          |             |                |                          |                           |                         |                           | 33                          | 20                           | 13                           | 20.48         | 20.85         | 48.67       | 10             |  |
| S4C8(2014)                       | -35               |                       |  | 22.36                                  |  |          | 29.9        | 7           | 69          |                |                          |                           |                         | 10.29                     | 30                          | 18                           | 12                           | 38.69         | 14.07         | 30.76       | 16.48          |  |
| S4C9(2014)                       | -40.5             |                       |  | 22.95                                  |  |          | 20          | 38          | 85          |                |                          |                           |                         | 10.94                     | 33                          | 20                           | 13                           | 4.83          | 29.97         | 43.35       | 21.85          |  |
| S17C1(2019)                      | -2.8              |                       |  | 20.4                                   | 17.6                                   |          |             |             | 188.3       |                |                          |                           |                         | 15.63                     | 39                          | 21                           | 18                           |               |               |             |                |  |
| S17C2(2019)                      | -6.2              |                       |  | 21.1                                   | 19.1                                   |          | 23.3        | 24.4        |             |                |                          |                           |                         | 10.52                     | 45                          | 21                           | 24                           | 18            | 26.4          | 27.3        | 28.3           |  |
| S17C3(2019)                      | -8.2              |                       |  | 19.5                                   | 18                                     |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 8.89                      | 34                          | 19                           | 15                           |               |               |             |                |  |
| S17C4(2019)                      | -13               |                       |  | 20.2                                   | 18.1                                   |          | 24.5        | 23.4        | 220.1       |                |                          |                           |                         | 10.98                     | 34                          | 17                           | 17                           | 18.3          | 33.2          | 29.7        | 18.8           |  |
| S17C5(2019)                      | -18               |                       |  | 22.3                                   | 20.6                                   |          |             |             | 311.1       |                |                          |                           |                         | 8.92                      | 37                          | 18                           | 19                           |               |               |             |                |  |
| S17C6(2019)                      | -15               |                       |  | 21.4                                   | 20.2                                   |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 6.09                      | 33                          | 18                           | 15                           | 44.3          | 28.3          | 16.7        | 10.7           |  |
| S18C1(2019)                      | -3.2              |                       |  | 20.5                                   | 18.1                                   |          |             |             | 84.6        |                |                          |                           |                         | 13.28                     | 33                          | 21                           | 12                           |               |               |             |                |  |
| S18C2(2019)                      | -3.4              |                       |  | 19.3                                   | 16.7                                   |          | 19.2        | 18.5        |             |                |                          |                           |                         | 12.01                     | 39                          | 19                           | 20                           | 38.7          | 21.3          | 24.7        | 15.2           |  |
| S18C3(2019)                      | -8.7              |                       |  | 21                                     | 18.7                                   |          |             |             |             |                |                          |                           |                         | 12.45                     | 37                          | 21                           | 16                           |               |               |             |                |  |
| S18C4(2019)                      | -11.6             |                       |  | 21.4                                   | 19.1                                   |          | 18.8        | 21.4        |             |                |                          |                           |                         | 12.32                     | 36                          | 20                           | 16                           | 12            | 42.5          | 30.6        | 14.9           |  |
| S18C5(2019)                      | -16.3             |                       |  | 21.1                                   | 19.4                                   |          |             |             | 175.1       |                |                          |                           |                         | 7.52                      | 36                          | 18                           | 18                           |               |               |             |                |  |

Tabella 4-4 – Sintesi dei risultati delle indagini sui campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità SUB del corpo diga.

## 4 RIEPILOGO PARAMETRI GEOTECNICI

La caratterizzazione parametrica dei materiali delle singole sub-unità è basata sulle risultanze delle indagini geonostiche in sito e di laboratorio appositamente eseguite per l'intervento in oggetto.

I parametri dei materiali adottati nel corso della presente progettazione definitiva sono rappresentati dai valori medi ( $V_m$ ), avendo assunto che i parametri caratteristici ( $V_k$ ) siano prossimi ai parametri nominali medi ( $V_m \approx V_k$ ) per ciascuna sub-unità geotecnica individuata nel capitolo 3.

Dal punto di vista geotecnico lo sbarramento della diga ed il terreno di fondazione è costituito dalle seguenti sub-unità:

- sub-unità LA1: corpo diga costituito da limi debolmente argillosi con clasti;
- sub-unità AL: corpo diga formato da argille debolmente limose con clasti;
- sub-unità LA2: corpo diga composto da limi argillosi con clasti;
- sub-unità SUB: substrato corpo diga caratterizzato dalla presenza di argillite con livello marnoso.

I dati disponibili sono ordinati criticamente in funzione delle successioni litologiche presenti nel sottosuolo dell'area in oggetto.

Nella Tabella 4-1 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA1 del corpo diga.

Nella Tabella 4-2 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità AL del corpo diga.

Nella Tabella 4-3 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità LA2 del corpo diga.

Nella Tabella 4-4 sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi dei campioni dei vari sondaggi prelevati nella sub-unità SUB costituente la fondazione del corpo diga.

I parametri geotecnici caratteristici dei materiali utilizzati sono riassunti nella Tabella 4-1.

| Parametri geotecnici  | Unità di misura   | Sub-unità LA1 | Sub-unità AL | Sub-unità LA2 | Sub-unità SUB |
|-----------------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| Peso di volume        | kg/m <sup>3</sup> | 2045          | 1936         | 2109          | 2169          |
| Peso di volume saturo | kg/m <sup>3</sup> | 2045          | 1936         | 2109          | 2169          |
| $\phi'$               | °                 | 21.6          | 24.2         | 23.4          | 23.6          |
| $c'$                  | kPa               | 24.0          | 23.0         | 22.0          | 24.0          |
| $c_u$                 | kPa               | 74.0          | 76.0         | 73.0          | 146.0         |
| k                     | m/s               | 1.0E-07       | 1.0E-08      | 1.00E-07      | 1.0E-08       |
| n (porosità)          |                   | 0.32          | 0.35         | 0.30          | 0.32          |

Tabella 4-1 – Parametri geotecnici caratteristici.

Alla luce dei risultati delle indagini, per i parametri geotecnici del terreno di rinfianco sono adottati parametri conservativi pari a quelli della sub-unità LA1.

## 5 VERIFICHE GEOTECNICHE DEL CORPO DIGA

Le verifiche per la sicurezza e le prestazioni sono svolte conformemente ai principi contenuti nel cap. 2 delle NTC 2018.

In accordo con il cap. E.5.1 del D.M. 26 Giugno 2014, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) sono svolte con il solo **Approccio 1**, con riferimento alla **Combinazione 2 (A2+M2+R2)**, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nella Tabella 2.6.I, nella Tabella 2.6.II e nella Tabella 5-1.

| Carichi          | Effetto     | Coefficiente parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ ) | EQU | (A1) | (A2)       |
|------------------|-------------|--|-----|------|------------|
| Permanenti $G_1$ | Favorevole  | $\gamma_{G1}$                                    | 0,9 | 1,0  | <b>1,0</b> |
|                  | Sfavorevole |  | 1,1 | 1,3  | <b>1,0</b> |
| Permanenti $G_2$ | Favorevole  | $\gamma_{G2}$                                    | 0,0 | 0,0  | <b>0,0</b> |
|                  | Sfavorevole |  | 1,5 | 1,5  | <b>1,3</b> |
| Variabili Q      | Favorevole  | $\gamma_{Qi}$                                    | 0,0 | 0,0  | <b>0,0</b> |
|                  | Sfavorevole |  | 1,5 | 1,5  | <b>1,3</b> |

(1) Per carichi permanenti G2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$ .

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (N.T.C. 2018).

| Parametro                                    | Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale | Coefficiente parziale $\gamma_M$ | (M1) | (M2)        |
|--|---|----------------------------------|------|-------------|
| Tangente dell'angolo di resistenza al taglio | $\tan \varphi'_k$                                       | $\gamma_{\varphi'}$              | 1,0  | <b>1,25</b> |
| Coesione efficace                            | $c'_k$  | $\gamma_{c'}$                    | 1,0  | <b>1,25</b> |
| Resistenza non drenata                       | $c_{uk}$  | $\gamma_{cu}$                    | 1,0  | <b>1,40</b> |
| Peso dell'unità di volume                    | $\gamma$  | $\gamma_\gamma$                  | 1,0  | <b>1,00</b> |

Tabella 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (N.T.C. 2018).

| Verifica         | Coefficiente parziale (R2) |
|------------------|----------------------------|
| Fasi costruttive | $\gamma_R = 1,1$           |
| Rapido svaso     | $\gamma_R = 1,1$           |
| Serbatoio pieno  | $\gamma_R = 1,2$           |

Tabella 5-1 – Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza delle dighe di materiali sciolti ai sensi del cap. E.5.1 del D.M. 26/06/2014.

La verifica dello sbarramento in condizioni simiche è condotta applicando i coefficienti parziali per le azioni e per i parametri geotecnici definiti dalle N.T.C. 2008, in quanto maggiormente cautelativi.

Infatti, come indicato al punto 7.11.1 delle N.T.C. 2008, le verifiche agli stati limite ultimi devono essere effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e impiegando i parametri geotecnici e le resistenze di progetto, con i valori dei coefficienti parziali indicati nel Cap. 6 (Tabella 6.2.II).

Viceversa, le N.T.C. 2018 al punto 7.11.1 indicano che le verifiche agli stati limite ultimi in presenza di azioni sismiche devono essere eseguite ponendo pari a 1 i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici.

## 6 VERIFICHE DEGLI STATI ULTIMI IDRAULICI

Le opere geotecniche sono verificate nei confronti dei possibili stati limite di sollevamento secondo quanto indicato al punto 6.2.4.2 N.T.C. 2008.

Per la stabilità al sollevamento deve risultare che il valore di progetto dell'azione instabilizzante sia non maggiore della combinazione dei valori di progetto delle azioni stabilizzanti e delle resistenze.

I coefficienti parziali sulle azioni sono indicati nella Tabella 6.2.III e devono essere combinati in modo opportuno con quelli relativi ai parametri geotecnici (M2).

In particolare, incrementando la pressione interstiziale di un coefficiente di 1.5, essendo un carico variabile sfavorevole, e riducendo la tensione totale di un coefficiente di 0.9, essendo un carico permanente favorevole, si perviene per le verifiche al sollevamento ad un coefficiente di sicurezza parziale  $\gamma_R = 1.67$ .

| Carichi          | Effetto     | Coefficiente parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ ) | Sollevamento UPL |
|------------------|-------------|--|------------------|
| Permanenti $G_1$ | Favorevole  | $\gamma_{G1}$                                    | <b>0,9</b>       |
|                  | Sfavorevole |  | <b>1,1</b>       |
| Permanenti $G_2$ | Favorevole  | $\gamma_{G2}$                                    | <b>0,0</b>       |
|                  | Sfavorevole |  | <b>1,5</b>       |
| Variabili Q      | Favorevole  | $\gamma_{Qi}$                                    | <b>0,0</b>       |
|                  | Sfavorevole |  | <b>1,5</b>       |

Tabella 6.2.III – Coefficienti parziali sulle azioni per le verifiche nei confronti degli stati limite di sollevamento.

La verifica idraulica al sifonamento è compiuta controllando che il gradiente idraulico risulti non superiore al gradiente critico diviso per un coefficiente parziale uguale a 2, avendo considerato il gradiente idraulico di efflusso.

In questo caso il coefficiente di sicurezza parziale  $\gamma_R = 2$ .