

DISMISSIONE DELLA DIGA DI BUNNARI BASSO E PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI SISTEMAZIONE IDRAULICA CONNESSE

STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

MANDATARIA:

 **Lombardi**

Lombardi Ingegneria S.r.l.
Ing. Carlo SILVESTRI

MANDANTI:

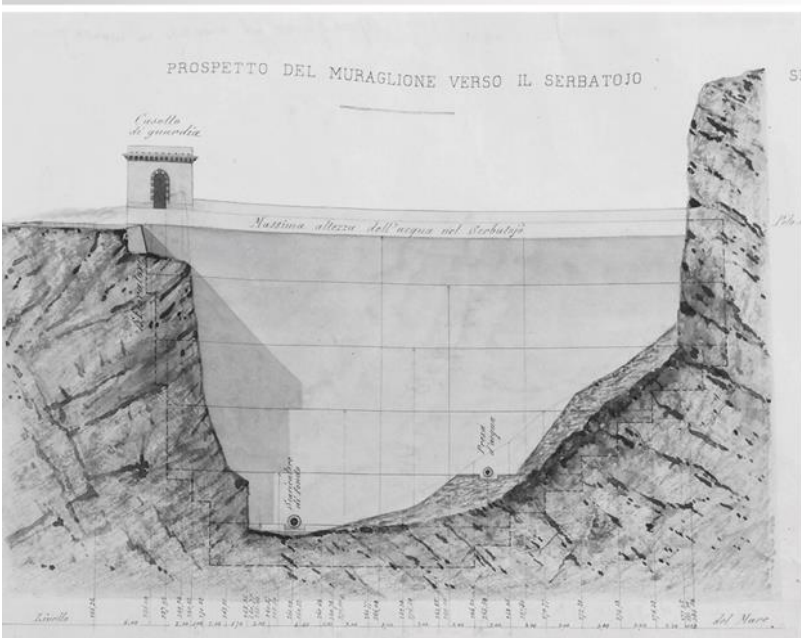
 **TECENTRAL**

 **Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

Archeologo N. FADDA



GEOTECNICA

Relazione geotecnica

2020_0275_002_GET_R001_0



COMUNE DI SASSARI

SETTORE LAVORI PUBBLICI E MANUTENZIONE
DEL PATRIMONIO COMUNALE

DISMISSIONE DELLA DIGA DI BUNNARI BASSO E PROGETTAZIONE DELLE OPERE
DI SISTEMAZIONE IDRAULICA CONNESSE

STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA


| | | | | | |
|----------|------------|-------------------|---------|------------|--------------|
| 0 | 13.08.2021 | Versione iniziale | X. Liu | C. Crémer | C. Silvestri |
| Versione | Data | Modifica | Redatto | Verificato | Approvato |

MANDATARIA:

 **Lombardi**

Lombardi Ingegneria S.r.l.

MANDANTI:

 **FESERTEC**

 **Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

ARCHEOLOGO
N. FADDA




Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | PREMESSA | 1 |
| 2 | DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 1 |
| 2.1 | ELaborati di riferimento | 1 |
| 2.2 | Normative tecniche | 1 |
| 2.3 | Bibliografia | 2 |
| 3 | INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE | 2 |
| 3.1 | Sondaggi | 2 |
| 4 | PROFILO STRATIGRAFICO | 7 |
| 5 | SUPERFICIE PIEZOMETRICA | 14 |
| 6 | CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI | 15 |
| 6.1 | Proprietà indice | 15 |
| 6.1.1 | <i>Analisi Granulometriche</i> | 15 |
| 6.1.2 | <i>Limiti di Atterberg</i> | 16 |
| 6.2 | Determinazione del peso di volume naturale | 18 |
| 6.3 | Prove penetrometriche dinamiche | 18 |
| 6.4 | Vane test | 19 |
| 6.5 | Prove di taglio diretto | 19 |
| 6.6 | Prova a Trazione indiretta (prova brasiliana) | 22 |
| 6.7 | Prova Compressione monoassiale | 23 |
| 6.8 | Point load test | 24 |
| 6.9 | Prove di carico su piastra | 25 |
| 6.10 | Prove di permeabilità | 26 |
| 6.10.3 | <i>Prove permeabilità Lugeon</i> | 26 |
| 6.10.4 | <i>Prove permeabilità Lefranc</i> | 29 |
| 7 | INDAGINI GEOFISICHE | 29 |
| 8 | CONCLUSIONI | 31 |

MANDATARIA:

 **Lombardi**
Lombardi Ingegneria S.r.l.

MANDANTI:

 **TECENITAL**

 **Metassociati**
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**
Lombardi SA Ingegneri Consulenti

ARCHEOLOGO
N. FADDA



1 PREMESSA

Il presente elaborato è stato redatto nell'ambito dello studio di fattibilità tecnica ed economica dei lavori di realizzazione delle opere di sistemazione idraulica connesse alla diga di Bunnari Basso e della dismissione della stessa a seguito dell'esigenza di adeguare alle vigenti normative la diga in oggetto.

Questa relazione riporta la caratterizzazione geotecnica dei terreni e degli ammassi rocciosi interessati dalla realizzazione di tali opere civili. Essa consiste nell'analisi delle indagini geognostiche attualmente disponibili, che sono state eseguite dall'impresa ICEIA srl di Cagliari per il conto del Comune di Sassari tra il 2004 e il 2006, sulla base del progetto dell'ing. Porcheddu.

La campagna di indagini effettuata interessa sia la zona diga sia il versante in sponda sinistra a valle del secondo sfioratore che è stata resa necessaria a seguito di una frana che pari interessi una porzione del versante.

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 ELABORATI DI RIFERIMENTO

- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Analisi di laboratorio su campioni – Sondaggi Diga Bunnari Basso (Maggio 2006)
- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Stratigrafie – Sondaggi Diga Bunnari Basso (Maggio 2006)
- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Prove di carico su piastra (Maggio 2006)
- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Prove di permeabilità Lugeon (Maggio 2006)
- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Prove di permeabilità Lefranc (Maggio 2006)
- Progetto Definitivo – Esecutivo – Indagini geognostiche – Prove SPT (Maggio 2006)
- Relazione - consulenza in fase di progetto, esecuzione ed interpretazione delle indagini di completamento per la caratterizzazione geomeccanica dei terreni di fondazione della diga di Bunnari Basso (prof. Balia).
- Indagini geofisiche nell'ambito dei lavori di adeguamento delle dighe di Bunnari alto e basso alle vigenti norme – prof. Balia (2004)

2.2 NORMATIVE TECNICHE

- [1] DM 17/01/2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.
- [2] DM 26/06/2014 – Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e trasverse).

MANDATARIA:

MANDANTI:

1



2.3 BIBLIOGRAFIA

- [3] Beniawski Z.T. (1974). "Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling"- Proceeding of the 3rd international Congress on Rock Mechanics, Denver, 27-32.
- [4] Tanzini M. (2006) "Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione". Flaccovio Editore.
- [5] Terzaghi K. (1946) "An Introduction to Tunnel Geology in Rock Tunnelling with Steel Supports" edited by R.V. Proctor and T.L. White. The Commercial Shearing and Stamping Co, Youngstown, Ohio, USA.
- [6] Associazione Geotecnica Italiana AGI (1977). "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche"
- [7] Lancellotta R. (1987). "Geotecnica", Zanichelli
- [8] Terzaghi K. (1943). "Theoretical soil mechanics". John Wiley & Sons, New York

3 INDAGINI GEOLOGICHE E GEOTECNICHE

Come anticipato, a partire dal 1997, l'Ing. A. Porcheddu di Sassari ha condotto e/o coordinato una serie pressoché continua di studi conoscitivi, e progettato e diretto gli interventi richiesti ed approvati dal Servizio Nazione Dighe per gli adeguamenti imposti dalle normative sulle dighe.

In particolare, nel 1998 è stato redatto dall'ing. Porcheddu il progetto preliminare dell'adeguamento delle Dighe Bunnari Alto e Basso alle normative allora vigenti, incluse le verifiche statiche delle due dighe.

Nel seguito è stata realizzata per la Diga Bassa una campagna di indagini geognostiche con rilievo geologico di dettaglio sulla sezione d'imposta, ed indagini sul corpo, spalle e fondazioni dell'opera di sbarramento. Inoltre, sono state eseguite indagini geofisiche per la valutazione delle condizioni generali statiche e di stabilità dell'opera di sbarramento, ai fini dell'individuazione di eventuali cavità e zone di indebolimento della struttura, e per la determinazione delle caratteristiche geomeccaniche delle rocce in posto. Infine, sono state condotte indagini geognostiche lungo il versante in sponda sinistra a valle del secondo sfioratore a seguito di una frana.

3.1 SONDAGGI

La campagna di indagini eseguita ha previsto sondaggi a carotaggio continuo, diametri 101mm, sul corpo diga e sulle spalle come mostrato nelle figure successive. I quattro sondaggi sulle spalle hanno lunghezza media di 10 e 20 m, mentre i 6 sondaggi verticali sul corpo diga hanno lunghezza di 40 m. Due dei sei sondaggi realizzati sul corpo diga hanno una profondità pari a 60 m, in modo tale da interessare la roccia di fondazione per circa 25-30 m.

| Sondaggio | Quota s.l.m. (m) | Profondità (m) |
|-----------|------------------|----------------|
|-----------|------------------|----------------|

MANDATARIA:

MANDANTI:



| | | |
|----|--------|-------|
| SA | 287.71 | 10.00 |
| SB | 287.80 | 20.00 |
| SC | 287.69 | 20.00 |
| SD | 287.63 | 10.00 |
| S1 | 287.72 | 40.00 |
| S2 | 287.69 | 60.00 |
| S3 | 287.71 | 40.00 |
| S4 | 287.69 | 40.00 |
| S5 | 287.69 | 60.00 |
| S6 | 287.63 | 40.00 |

Tabella 1 Sondaggi – Corpo Diga

A completamento per la caratterizzazione del substrato di fondazione, è stato previsto l'esecuzione di 10 sondaggi, dei quali 5 a monte e 5 a valle dello sbarramento distanti non più di 20 m dal manufatto. I sondaggi, eseguiti a carotaggio continuo, si spingono a una profondità di 25-30 m.

| Sondaggio | Quota s.l.m. (m) | Profondità (m) |
|-----------|------------------|----------------|
| S100 | 262.19 | 25.00 |
| S101 | 262.30 | 30.00 |
| S102 | 262.11 | 25.00 |
| S200 | 268.84 | 35.00 |
| S201 | 267.99 | 25.00 |
| S202 | 267.12 | 25.00 |
| S203 | 267.76 | 25.00 |
| S204 | 268.25 | 25.00 |
| S1000 | 261.54 | 23.00 |
| S2000 | 261.50 | 23.00 |

Tabella 2 Sondaggi a monte e valle diga

A seguito della frana che si è verificata sul versante in sponda sinistra a valle del secondo sfioratore si è ritenuto necessario eseguire una campagna di indagini per individuare le caratteristiche fisico meccaniche del versante stesso. 7 fori a carotaggio continuo verticali di diametro 101mm sono stati eseguiti.

| Sondaggio | Quota s.l.m. (m) | Profondità (m) |
|-----------|------------------|----------------|
| S7 | 268.98 | 25.00 |
| S8 | 288.40 | 25.00 |
| S9 | 288.80 | 25.00 |
| S10 | 290.14 | 25.00 |
| S11 | 288.82 | 25.00 |
| S12 | 289.43 | 15.00 |
| S13 | 294.21 | 15.00 |



Tabella 3 Sondaggi zona frana

Le planimetrie riportate di seguito illustrano sia le indagini eseguite sia l'ubicazione delle indagini svolte.

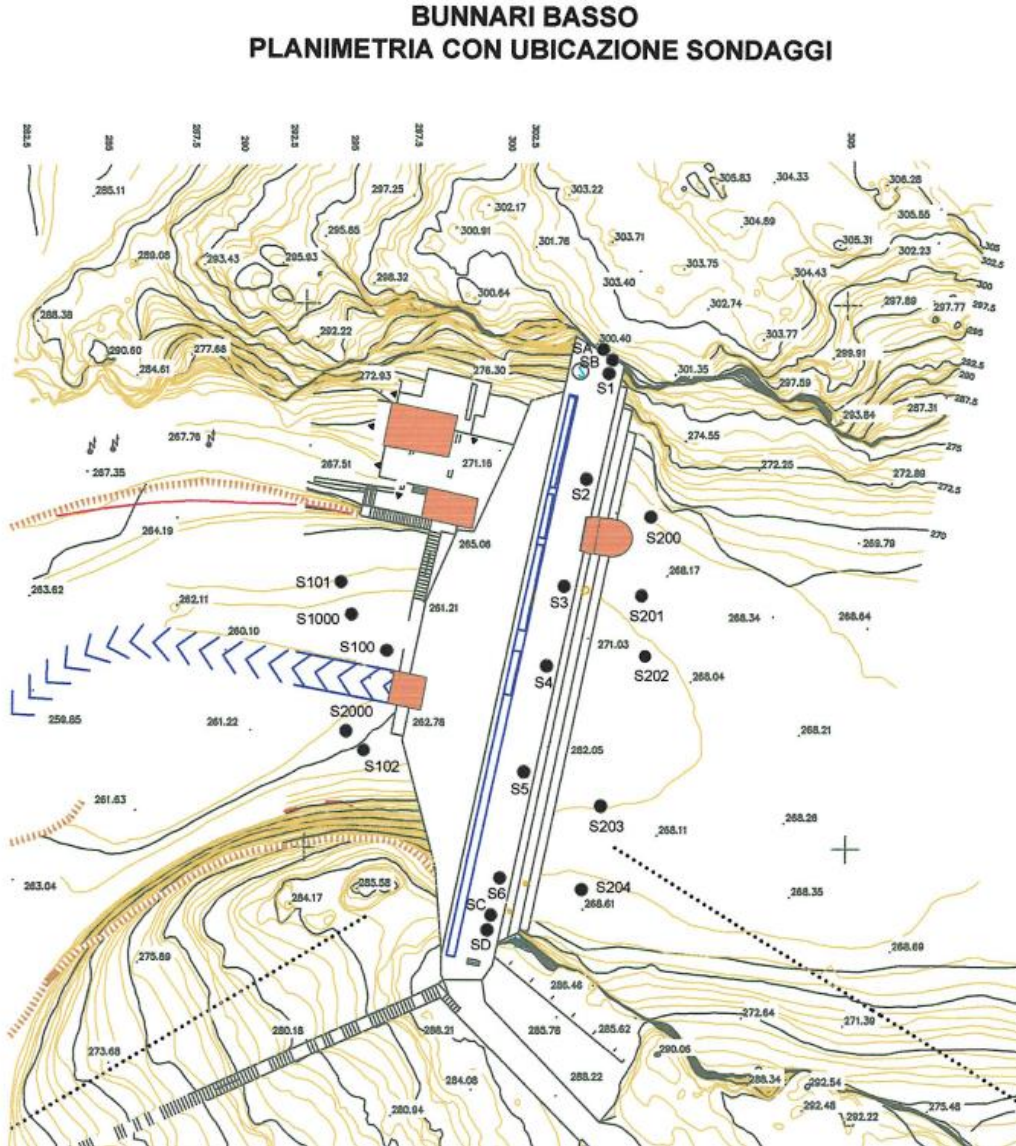


Figura 1: Planimetria con ubicazione dei sondaggi eseguiti in zona diga Bunnari Basso

MANDATARIA:

MANDANTI:



**BUNNARI BASSO - ZONA FRANA
PLANIMETRIA CON UBICAZIONE SONDAGGI**

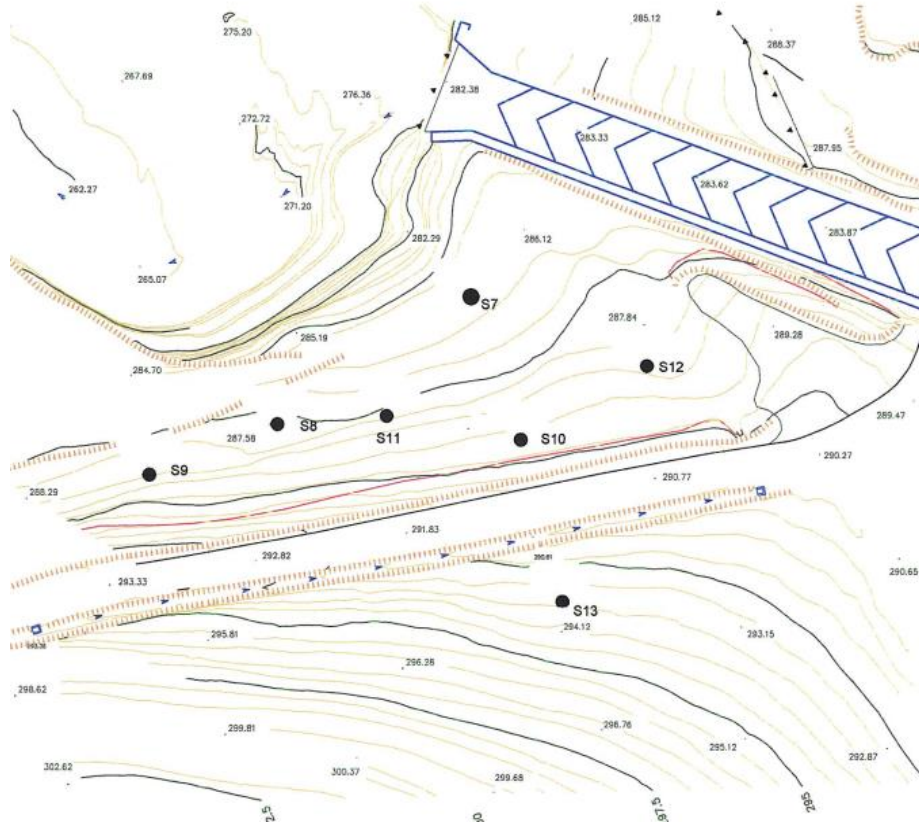


Figura 2: Planimetria con ubicazione dei sondaggi eseguiti in zona frana in sponda sinistra

MANDATARIA:

MANDANTI:



Le prove in situ eseguite sono le seguenti:

- Prospezione e rilevazione in foro con telecamera (risultati non disponibili);
- Prove di permeabilità;
- Prove dilatometriche-pressiometriche (risultati non disponibili);
- Prove penetrometriche SPT.

Le prove in situ sono state integrate da un insieme di prove di laboratorio su campioni estratti, in particolare:

- Analisi petrografica e mineralogica;
- Determinazione dei limiti di Atterberg;
- Peso di volume;
- Point load test;
- Compressione monoassiale;
- Compressione triassiale;
- Prova di trazione;
- Prove di taglio diretto.

A completamento delle indagini geotecniche sono state previste l'esecuzione di una campagna di prove geofisiche diffuse sull'intera struttura e prove di carico in situ.



4 PROFILO STRATIGRAFICO

La campagna geognostica ha quindi messo in luce alcuni aspetti importanti riguardanti la geologia-geotecnica del sottosuolo dell'area di interesse. Di seguito si riportano gli studi relativi alla zona interessata dalla frana e alla zona diga. I profili geologici lungo l'asse della diga e lungo la zona frana sono stati costruiti sulla base dell'analisi dei log stratigrafici dei sondaggi realizzati e riportati di seguito. In generale si distinguono le seguenti unità geotecniche:

- Detriti eluvio – colluvionali;
- Riporto connesso all'azione antropica;
- Fanghi di deposito fondo invaso;
- Manufatto cementizio di matrice carbonatica;
- Roccia vulcanica con processo di argillificazione;
- Roccia vulcanica (andesite);
- Roccia vulcanica (dacite).

Zona frana

Attraverso i sondaggi eseguiti si è individuato uno strato di detrito eluvio – colluvionale di spessore variabile dai 2 ai 3m.

Il dato maggiormente significativo è la presenza di aree interessate da un processo di argillificazione molto spinto che può tradursi in un indebolimento generale del materiale lapideo, con conseguenti distacchi, scagliature, esfoliazioni fino anche ad una vera e propria disgregazione.

I sondaggi numero S7, S8, S9, S10, S11, S12 e S13 hanno evidenziato la presenza di questo strato orizzontale il cui tetto è posizionato tra i 2 e i 3 metri di profondità, spessore dai 7 ai 16 metri.

Al di sotto di questo prevalgono le rocce vulcaniche (andesite) compatte, caratterizzate dalla presenza di fenocristalli immersi in pasta di fondo fine. I valori di RQD risultano dell'ordine di 80-100% per gli ultimi metri in roccia andesitica mentre nel tratto in cui si presentano andesiti argillificate mostrano RQD pari a 0%.

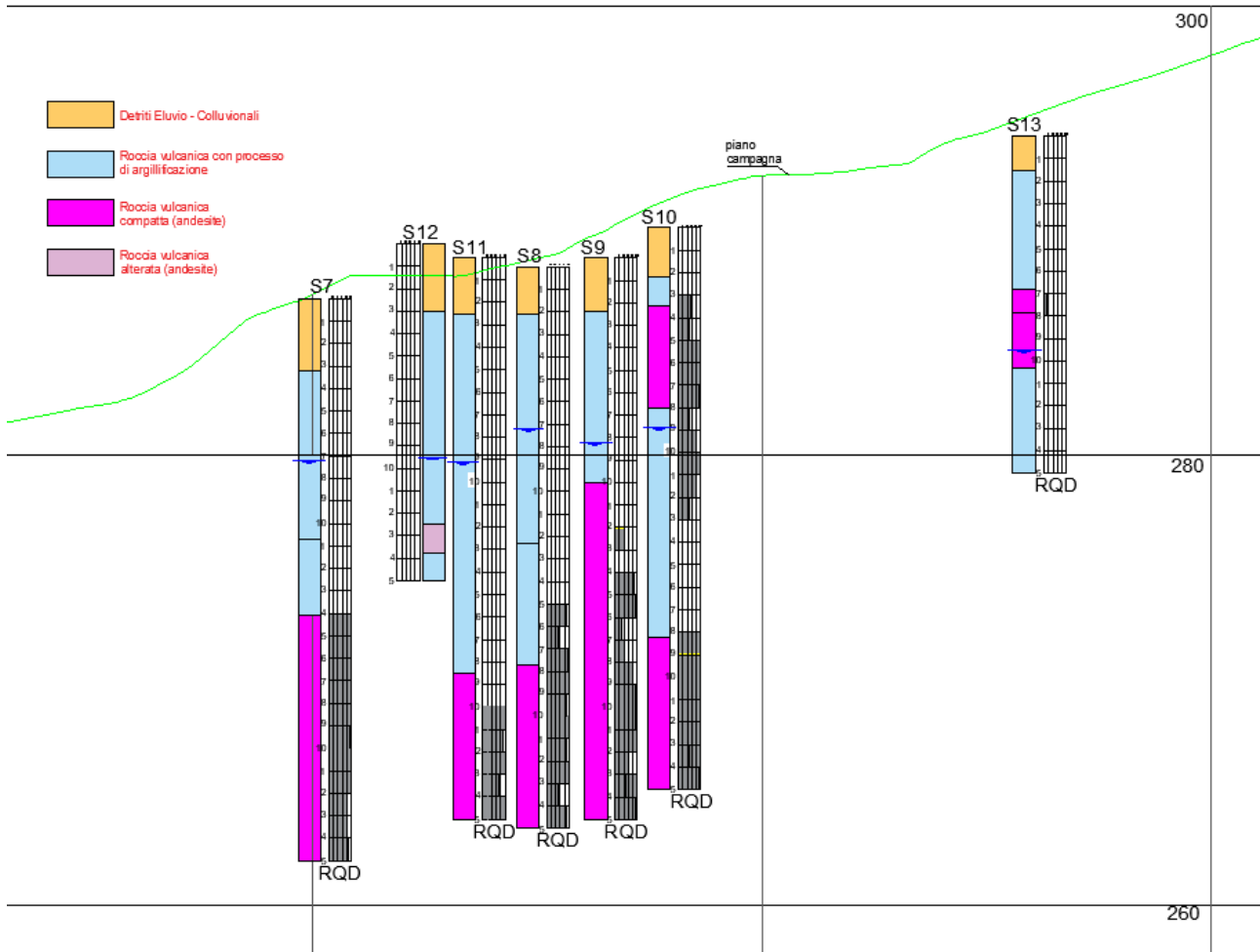


Figura 3: Profilo stratigrafico zona frana

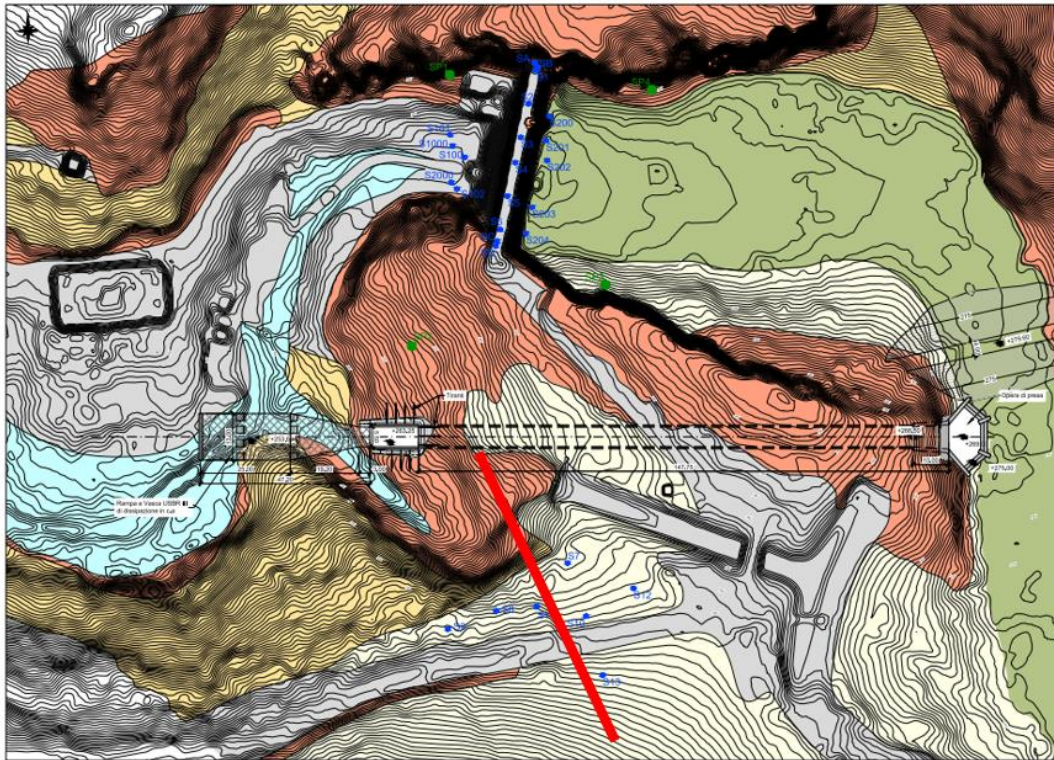


Figura 4: Ubicazione sezione zona frana

Zona Diga

I sondaggi numero S1, S2, S3, S4, S5 e S6 eseguiti in corrispondenza del corpo diga hanno attraversato il manufatto cementizio costituito da elementi di matrice carbonatica costituita da cemento ed elementi da millimetrici a 1cm. I litotipi impiegati rispecchiano le litologie presenti nell'area; si tratta di clasti di vulcanite che presentano abbondante alterazione. Gli stessi sondaggi hanno evidenziato la presenza dello strato interessato dal processo di argillificazione molto spinto il cui tetto si riscontra a profondità molto variabili rispetto al piano di fondazione diga e di uno strato di vulcanite che mostra un aspetto compatto. In dettaglio, in corrispondenza di S1 la diga appoggia su andesiti compatte con RQD pari a 100%, mentre nel tratto più profondo si presentano andesiti alterate, tenere e friabili, e mostrano RQD pari a 0%. La presenza delle andesiti migliora a partire dal sondaggio S4, dove esse si presentano molto fratturate ma decisamente meno alterate e con valori di RQD anche dell'ordine di 60-70. Questo miglioramento è più evidente in S5 e S6 dove le andesiti mostrano discrete qualità, con valori di RQD anche dell'ordine di 80-100% soprattutto nei primi metri di spessore al contatto con il manufatto.

I sondaggi numero SA, SB, SC e SD eseguiti alle spalle mostrano dacite compatta di ottime qualità, sia sulla spalla destra che sinistra. Questo viene confermato dai valori di RQD che non raramente inferiori a 80%.

MANDATARIA:

MANDANTI:



I sondaggi numero S100, S101, S102, S1000 e S2000 eseguiti a valle del corpo diga individuano strati di vulcanite compatta sotto uno strato di 1 a 3 m di riporti antropici, mentre i sondaggi S200, S201, S202, S203 e S204 eseguiti a monte del corpo diga hanno identificato fanghi di deposito fondo invaso con profondità fino ai 10 m (variabile da 5 a 10 m), strati con potenze di circa 5m di vulcanite compatta alterati a strati di vulcanite argillificata fortemente disgregata. Per quest'ultimi sondaggi, i valori di RQD sono in pratica costantemente pari a 0 nei sondaggi S200 ed S203, dispersi e discontinui (0-90) in S202 e S204, da sufficienti a eccellenti (55-100) in S201.

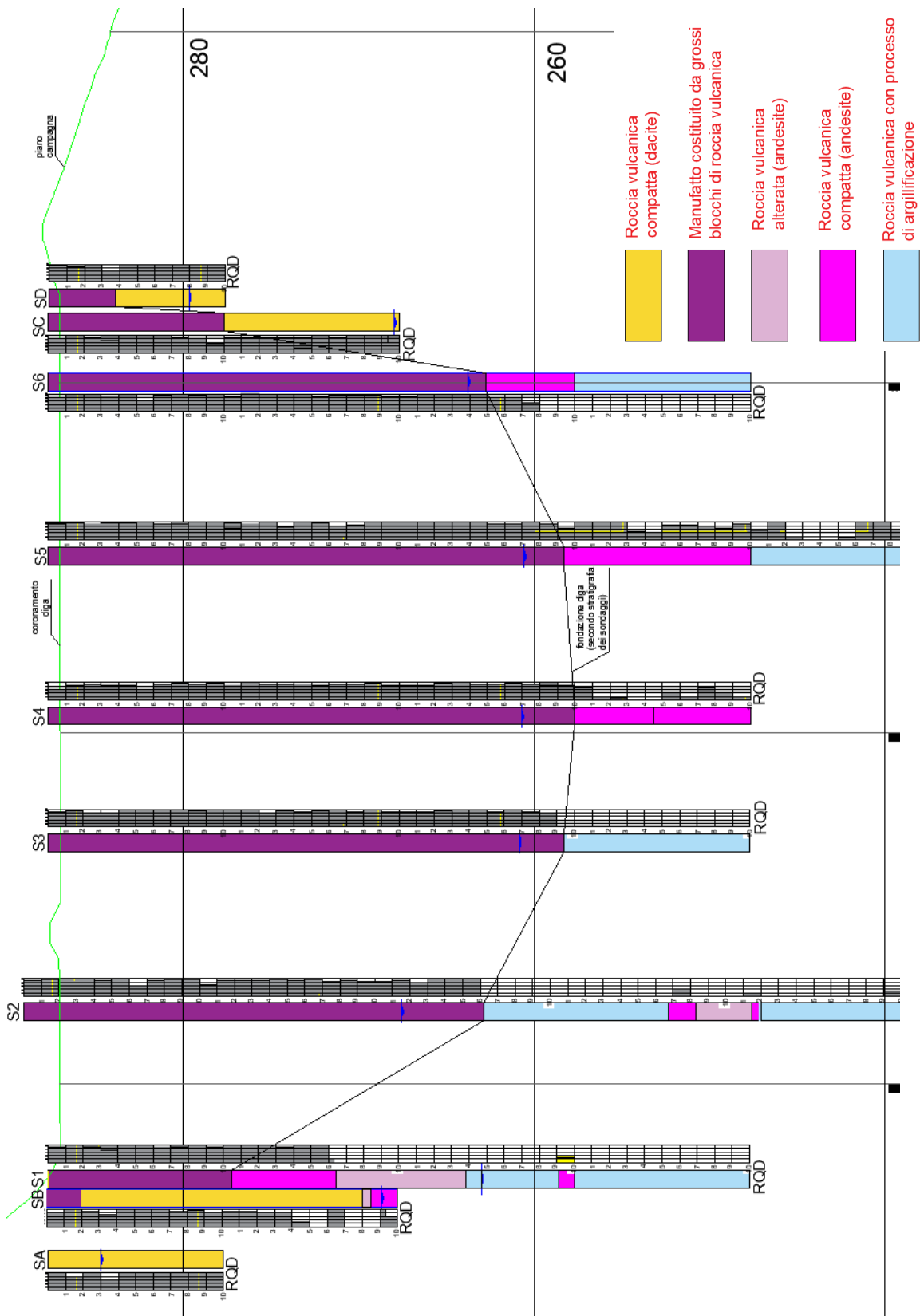


Figura 5: Profilo stratigrafico – corpo diga

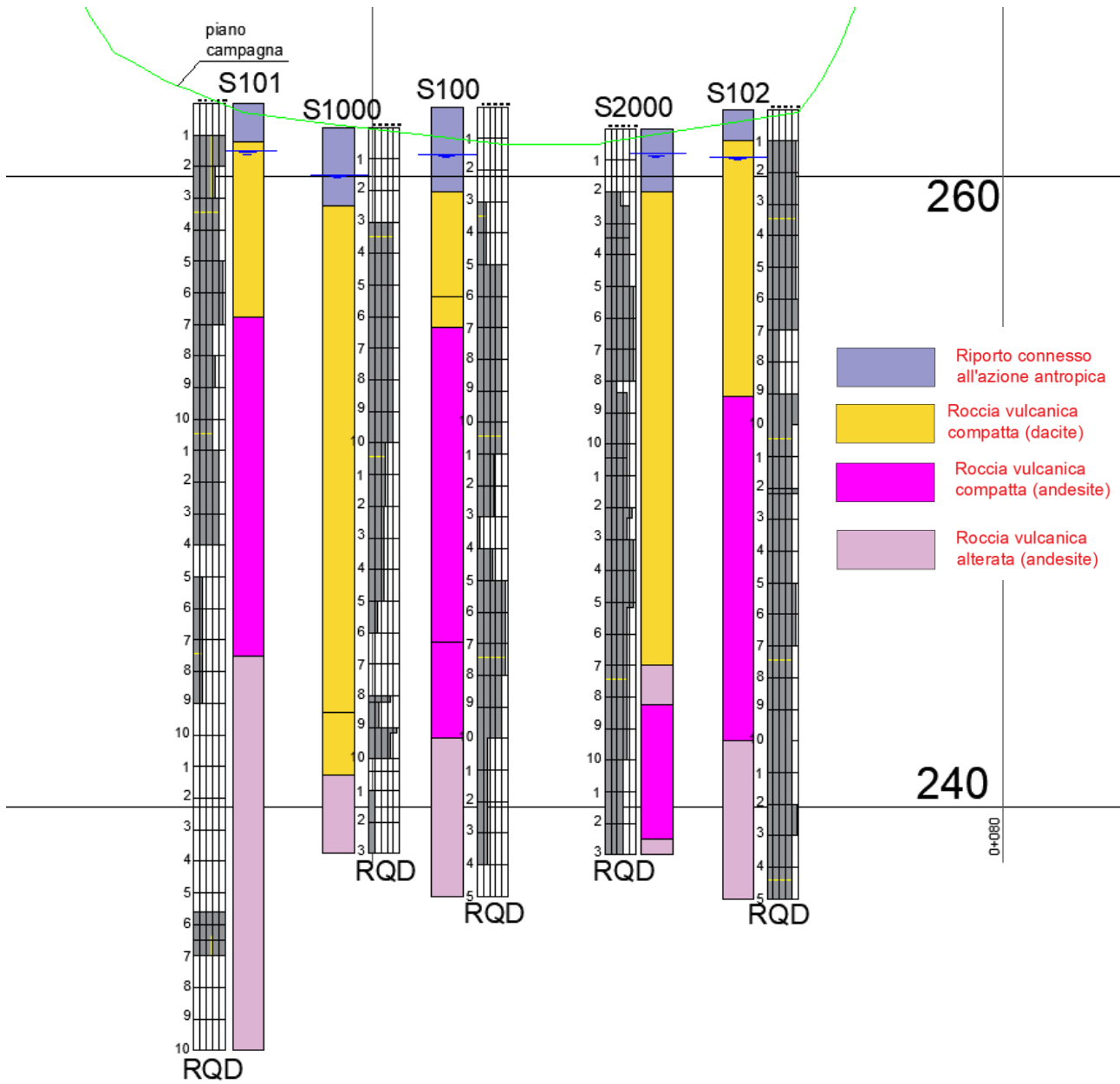


Figura 6: Profilo stratigrafico – valle diga

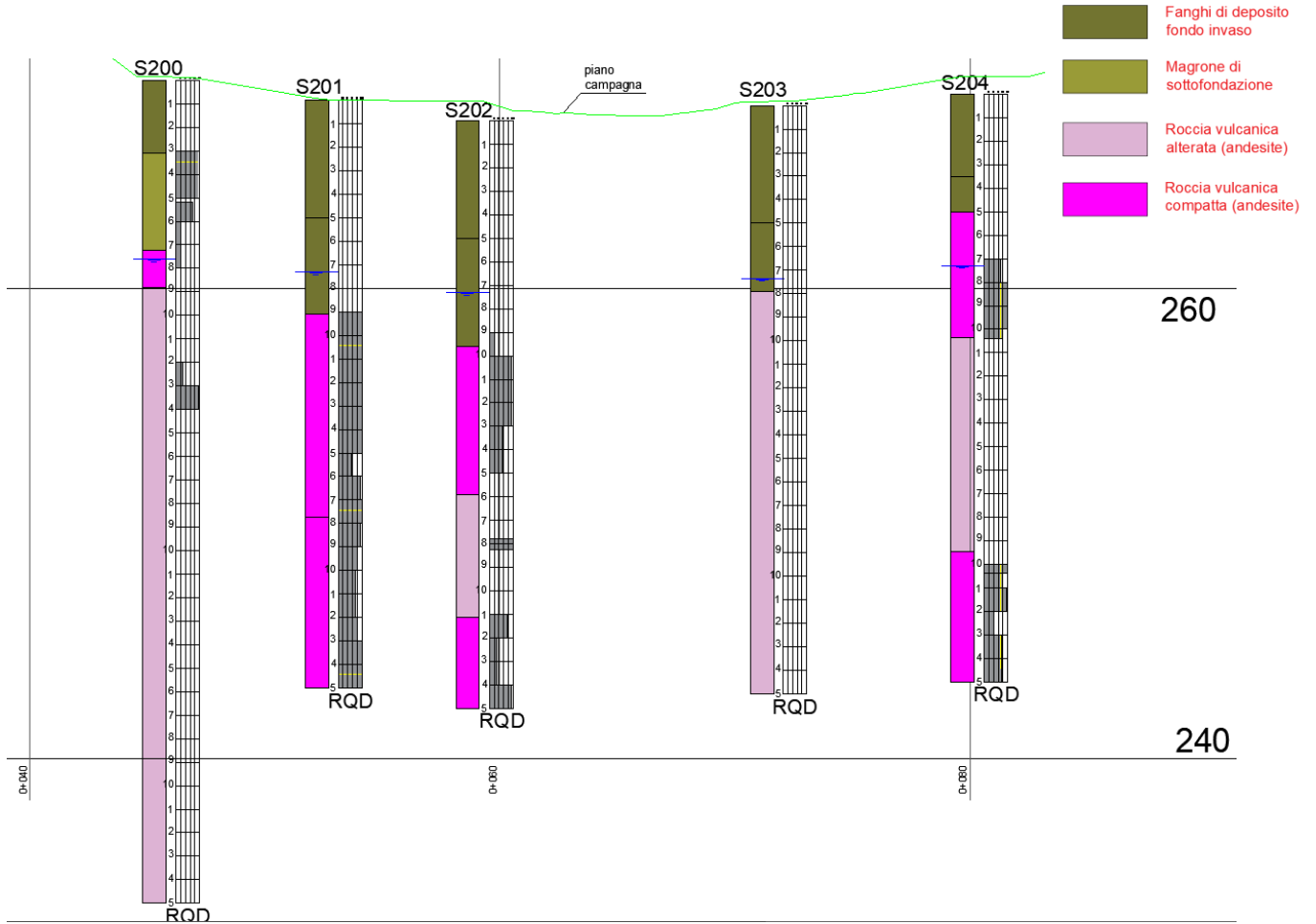


Figura 7: Profilo stratigrafico – monte diga

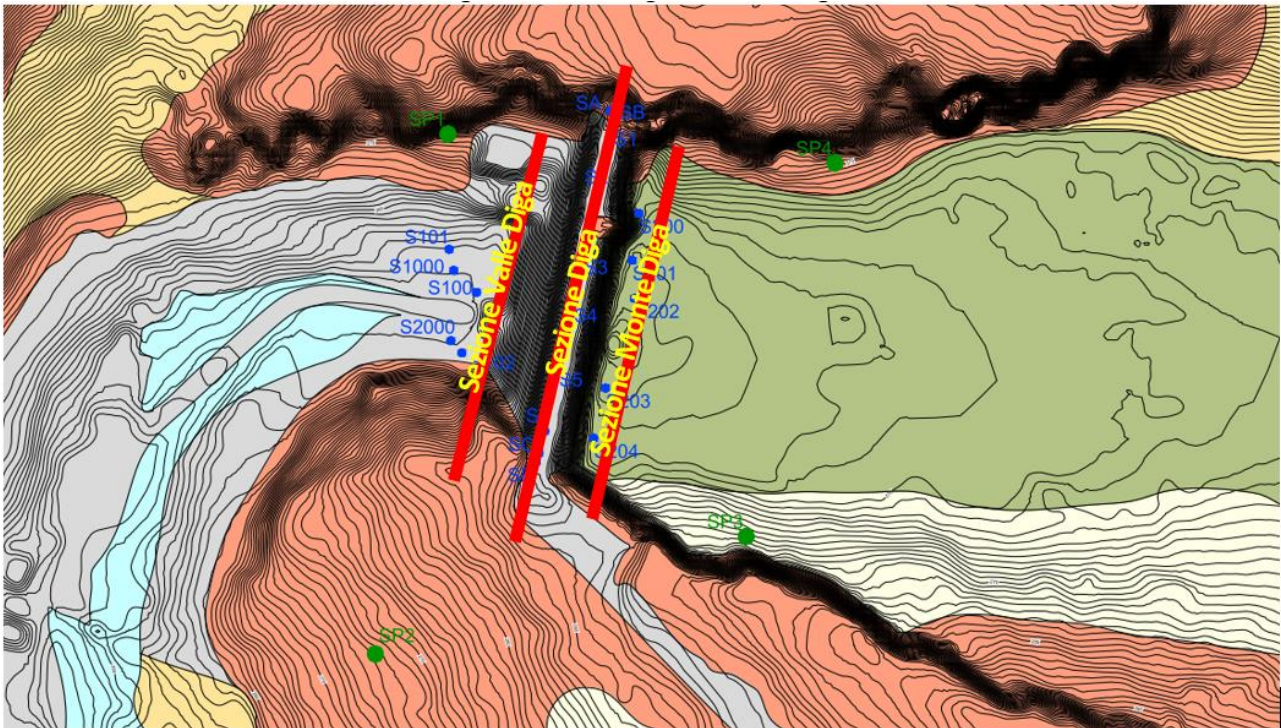


Figura 8: Ubicazione sezioni diga

5 SUPERFICIE PIEZOMETRICA

Attraverso le informazioni ricavate dai piezometri messi in opera durante la campagna geognostica eseguita nel 2006 è stato tracciato il profilo piezometrico lungo lo sviluppo dell'opera e nella zona di frana. Rimandando alla relazione idrogeologica per maggiori dettagli ed una più ampia trattazione del problema, si può segnalare la presenza della falda ad una quota altimetrica di ca. 260 – 261m.s.l.m nella zona della diga (1.50m dal p.c. nella zona a valle della diga ed a 7m dal p.c. nella zona di monte).

Per il versante in zona di frana invece, la falda è stata misurata ad una profondità variabile da 7 a 9m rispetto al p.c., con una superficie piezometrica che segue il profilo topografico.

6 CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI

6.1 PROPRIETÀ INDICE

6.1.1 *Analisi Granulometriche*

Sono state eseguite complessivamente 19 analisi granulometriche sui campioni di terreno sciolto e roccia argillificata prelevati nei sondaggi nella zona di frana. Le figure seguenti riportano i risultati delle analisi granulometriche in termini di percentuali di ciottoli e blocchi, ghiaia, sabbia, limo e argilla per i vari terreni identificati in precedenza. Come si può notare dalle figure si tratta prevalentemente di limo con sabbia debolmente ghiaiosa per i detriti eluvio – colluvionali e sabbia con limo debolmente ghiaiosa per la roccia vulcanica con processo di argillificazione molto spinto. Non essendo state fatte analisi granulometriche per sedimentazione, la percentuale di argilla contenuta nella frazione fine non è conosciuta.

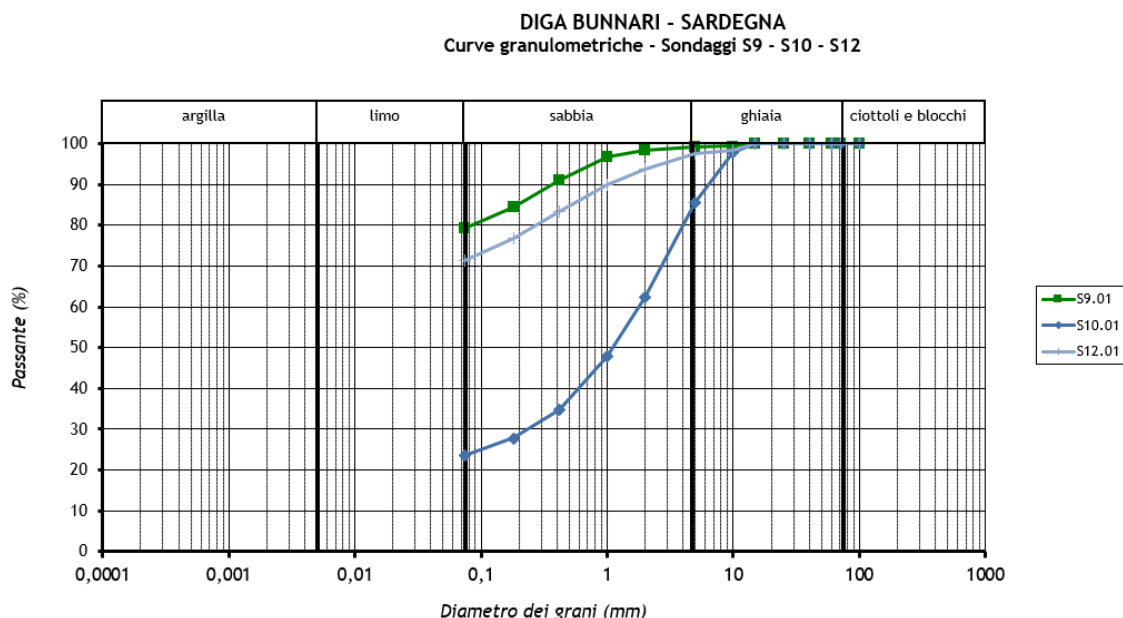


Figura 9: Detriti Eluvio – colluvionali ed alluvionali attuali e recenti

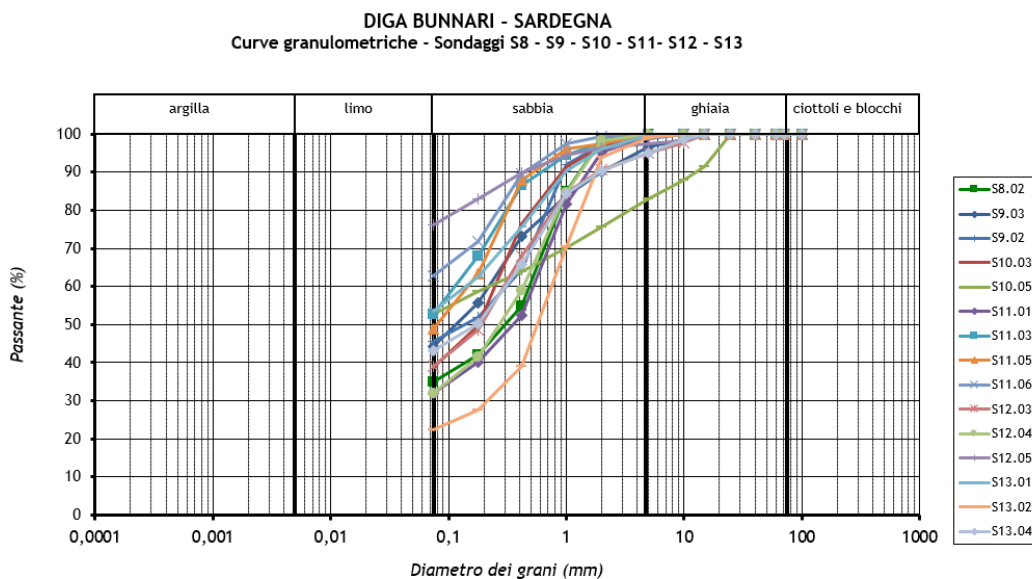


Figura 10: Roccia vulcanica con processo di argillificazione molto spinta

Per la componente fine si riporta lo studio con la carta di plasticità di Casagrande nel capitolo successivo.

6.1.2 Limiti di Atterberg

Sui 17 campioni prelevati sono stati determinati il limite plastico (LP) e il limite liquido (LL). I valori del limite plastico risultano compresi fra il 15% e il 28% mentre i valori del limite liquido sono compresi fra il 35% e il 62%. L'indice di plasticità varia da un minimo pari a 17 a un massimo pari a 40, per cui il materiale viene classificato come materiale coesivo.

| Unità geotecnica | Sondaggio | Profondità | LL (%) | IP (%) | INDICE DI PLASTICITA' |
|--------------------------------|-------------|-------------|--------|--------|-----------------------|
| Roccia vulcanica argillificata | S8.02 | 4,00-4,35 | 39 | 19 | 20 |
| | S8.04 | 11,35-11,73 | 39 | 19 | 20 |
| | S9.02 | 4,60-4,90 | 47 | 22 | 25 |
| | S9.03 | 7,60-8,00 | 35 | 15 | 20 |
| | S10.03 | 10,23-10,60 | 42 | 22 | 20 |
| | S10.05 | 17,00-17,50 | 52 | 24 | 28 |
| | S11.01 | 4,45-4,70 | 45 | 23 | 22 |
| | S11.06 | 16,00-16,50 | 49 | 18 | 31 |
| | S12.03 | 6,55-7,00 | 39 | 20 | 19 |
| | S12.04 | 11,00-11,40 | 39 | 20 | 19 |
| | S12.05 | 12,00-12,50 | 54 | 18 | 36 |
| | S13.01 | 2,00-2,30 | 50 | 28 | 22 |
| | S13.02 | 5,00-5,45 | 37 | 20 | 17 |
| S13.04 | 14,50-14,75 | 41 | 21 | 20 | |
| Detriti eluvio – colluvionali | S10.01 | 1,45-2,00 | 62 | 22 | 40 |
| | S12.01 | 2,20-2,50 | 52 | 21 | 31 |



Tabella 4 Limiti di Atterberg

Nella figura seguente viene riportata la carta di plasticità di Casagrande per le diverse unità in modo tale da avere indicazioni sulle caratteristiche di plasticità dei terreni a grana fine sulla base delle prove effettuate. Dalla figura si nota che la componente fine dei campioni prelevati nello strato argillificato della roccia vulcanica risulta principalmente di tipo argilla inorganica di media plasticità.



Carta di Casagrande

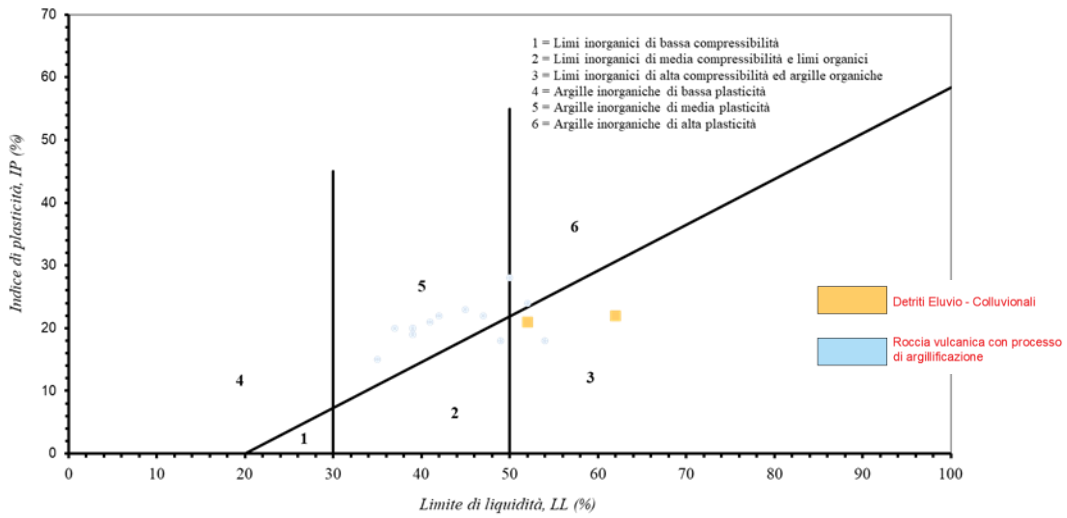


Figura 11: Carta di Casagrande



6.2 DETERMINAZIONE DEL PESO DI VOLUME NATURALE

Il volume del provino viene misurato mediante pesata in acqua a temperatura ambiente. Di seguito si riportano i valori per ciascuna unità geotecnica.

| Zona | Unità geotecnica | γ_n range | γ_n medio |
|------------|---|-------------------|-------------------|
| | | kN/m ³ | kN/m ³ |
| CORPO DIGA | Manufatto cementizio di matrice carbonatica | 15,7-23,3 | 19,5 |
| | Roccia vulcanica (andesite) alterata | - | 22,3 |
| | Roccia vulcanica (andesite) compatta | 22,2-25 | 23,4 |
| MONTE DIGA | Roccia vulcanica (andesite) compatta | 24,5-25,2 | 24,9 |
| VALLE DIGA | Roccia vulcanica (andesite) compatta | - | 24,7 |
| | Roccia vulcanica (dacite) | 23,3-23,7 | 23,5 |

Tabella 5 Peso di volume

Dalla tabella precedente, si nota che il manufatto cementizio ha valori medi di peso pari a 19.5 kN/m³, la roccia vulcanica andesitica intorno a valori pari a 25.5 kN/m³, mentre per la roccia vulcanica dacite valori di peso pari 23.5 kN/m³.

6.3 PROVE PENETROMETRICHE DINAMICHE

La caratterizzazione fisico – meccanica dei terreni è stata effettuata utilizzando prove penetrometriche in situ (SPT). Le prove sono state eseguite unicamente nella zona a monte e a valle della diga all'interno dei fori dei sondaggi a profondità differenti in cui si riscontra la presenza di roccia vulcanica alterata.

Il valore di SPT è dato dalla somma dei colpi ottenuti nel 2° e 3° tratto (ultimi 30 cm). Il raggiungimento del "rifiuto" e, quindi, la fine della prova si determinano nei seguenti casi:

- Un numero di colpi superiore a 50 per l'infissione nel primo tratto di 15 cm;
- Un numero di colpi superiore a 100 per l'infissione nel secondo e nel terzo tratto (ultimi 30 cm).

I risultati delle prove mostrano materiale molto consistente, in quanto le prove raggiungono la condizione di rifiuto in tutti i casi effettuati. Nella tabella seguente vengono riportati i risultati delle prove.

| Sondaggio n. | Quota (m) | SPT – N colpi |
|--------------|-------------|---------------|
| S100 | 24.85-25.00 | Rifiuto |
| S101 | 19.10-19.25 | Rifiuto |
| | 21.10-21.25 | |
| S200 | 9.55-10.00 | Rifiuto |
| | 12.40-12.85 | |
| | 15.30-15.75 | |
| | 17.50-17.95 | |
| | 18.30-18.75 | |
| | 22.95-23.40 | |
| S202 | 27.50-27.95 | Rifiuto |
| | 15.70-16.15 | |



| | | |
|------|--|---------|
| | 17.45-17.90 20.20-20.65 | |
| S203 | 10.10-10.55 14.00-14.45 15.80-16.25 18.20-18.65 21.30-21.75 22.30-22.75 | Rifiuto |
| S203 | 10.10-10.55 14.00-14.45 15.80-16.25 18.20-18.65 21.30-21.75 22.30-22.75 | Rifiuto |
| S204 | 11.50-11.95 12.40-12.85 13.80-14.25 16.80-17.25 18.80-19.25 | Rifiuto |

Tabella 6 Prove penetrometriche dinamiche

6.4 VANE TEST

Per la roccia vulcanica con argillificazione molto spinto in corrispondenza della zona di frana sono state eseguite prove scissometriche denominate "Vane Test", per la determinazione della resistenza al taglio non drenata c_u .

Nella tabella seguente si riportano i risultati. I campioni mostrano un valore medio di resistenza al taglio non drenata pari a 83 kPa, con valori minimi pari a 30 kPa e massimi pari a 140 kPa.

| Campione | Profondità | Vane test c_u kPa |
|----------|-------------|------------------------|
| S8.02 | 4,00-4,35 | N.D. |
| S9.03 | 7,60-8,00 | 50 |
| S10.05 | 17,00-17,50 | 100 |
| S11.03 | 7,00-7,40 | 140 |
| S12.03 | 6,55-7,00 | 45 |
| S12.04 | 11,00-11,40 | 30 |
| S13.01 | 2,20-2,30 | 140 |
| S13.04 | 14,50-14,75 | 80 |

Tabella 7 Prove scissometriche (Vane Test)

6.5 PROVE DI TAGLIO DIRETTO

Prove di taglio diretto sono state eseguite sulla roccia vulcanica argillificata per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio. La prova è stata eseguita con la scatola a taglio di Casagrande. Di seguito vengono riportati i valori di coesione e angolo di attrito dedotti per ciascuna prova. Il valore medio della coesione risulta essere pari a 40.4 kPa, mentre l'angolo di attrito pari a 30.5°.



| ZONA FRANA | | | | | | |
|-------------------------|-------------|--|-------------------------|-------------------------|-----------|--------|
| Prova di Taglio diretto | | | | | | |
| Campione | Quota | Descrizione | Carico verticale kPa | Sforzo al taglio kPa | c' kPa | Φ ° |
| S10.03 | 10,23-10,60 | Roccia argillificata | 100 | 129,85 | 53,14 | 36,58 |
| | | | 200 | 196,59 | | |
| | | | 300 | 278,28 | | |
| S11.06 | 16,00-16,50 | Argilla limosa compatta | 100 | 72,97 | 19,67 | 28,45 |
| | | | 200 | 129,8 | | |
| | | | 300 | 181,34 | | |
| S12.05 | 12,00-12,50 | Argilla compatta | 100 | 105,39 | 60,95 | 23,70 |
| | | | 200 | 147,66 | | |
| | | | 300 | 193,18 | | |
| S13.02 | 5,00-5,45 | Roccia alterata in matrice argillo sabbiosa | 100 | 92,67 | 28,01 | 33,62 |
| | | | 200 | 164,67 | | |
| | | | 300 | 225,66 | | |

Tabella 8 Prove di taglio dirette

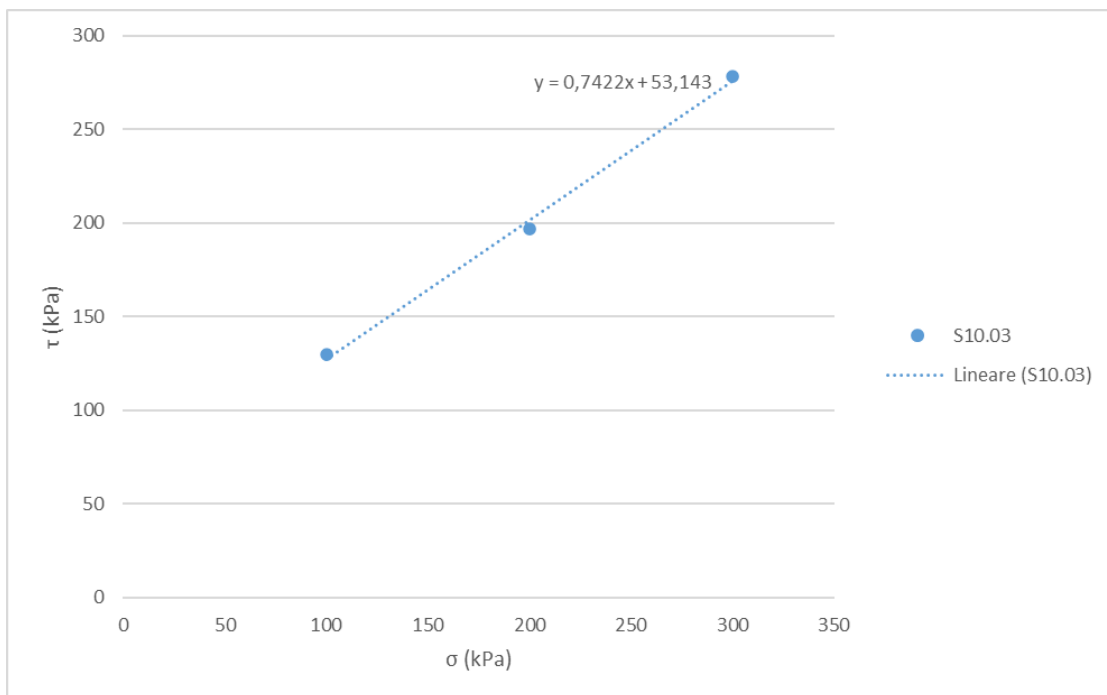


Figura 12: Prova taglio diretto - Sondaggio S10.03

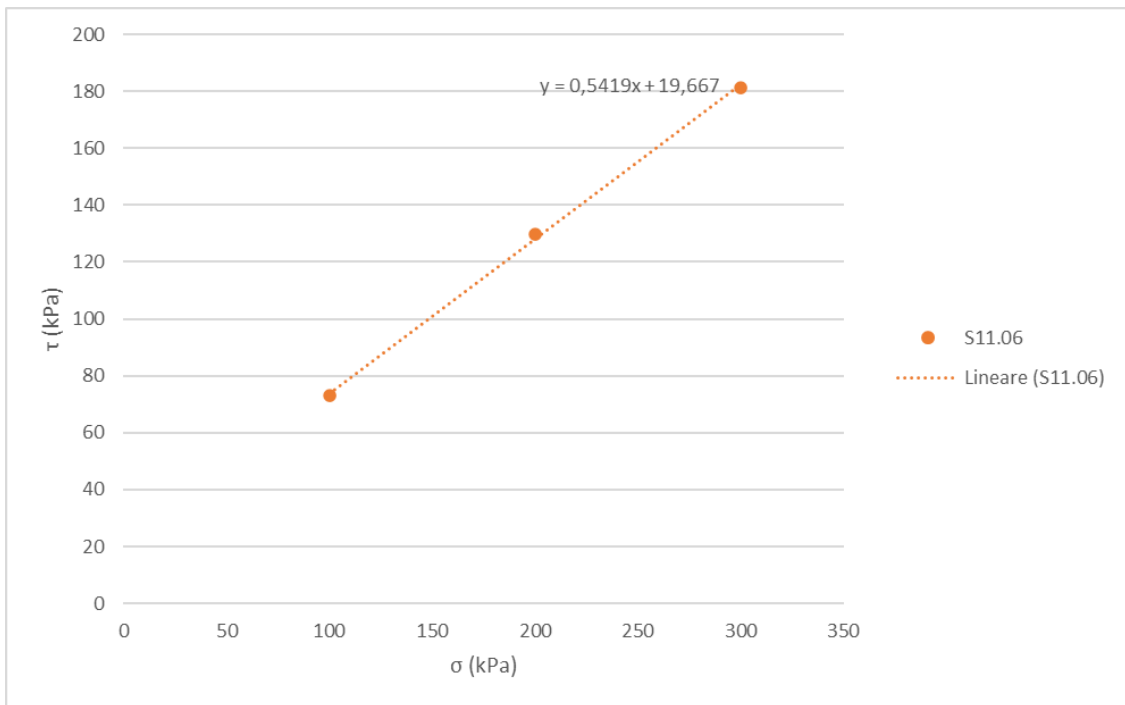


Figura 13: Prova taglio diretto - Sondaggio S11.06

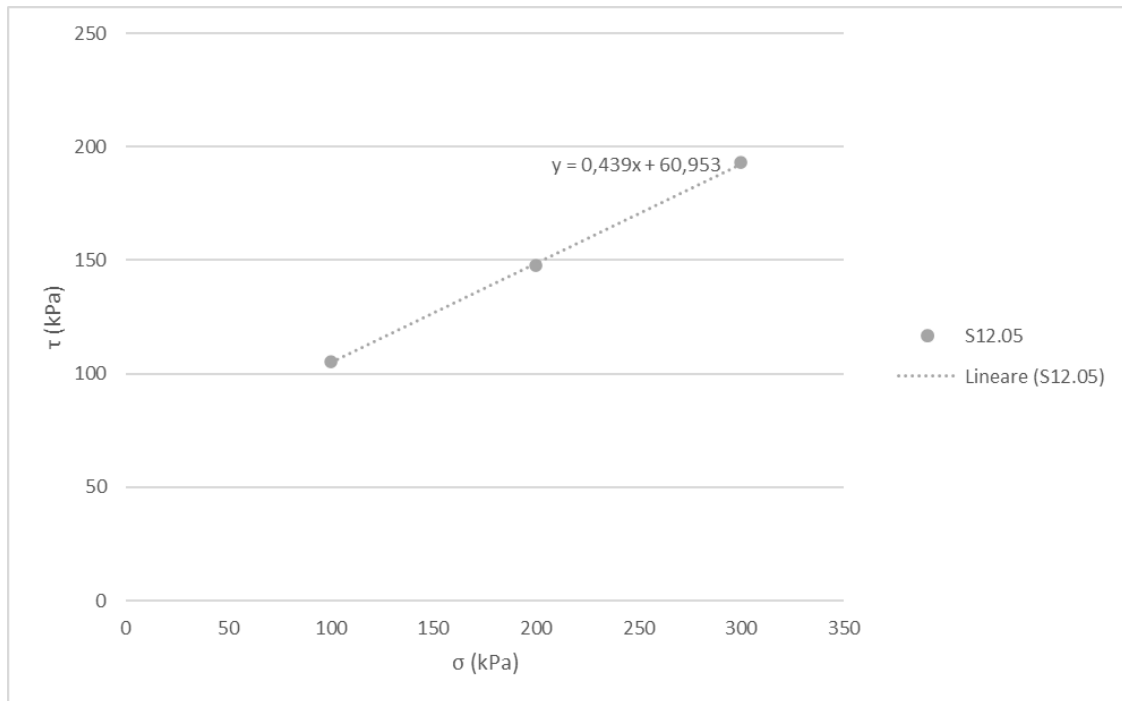


Figura 14: Prova taglio diretto - Sondaggio S12.05

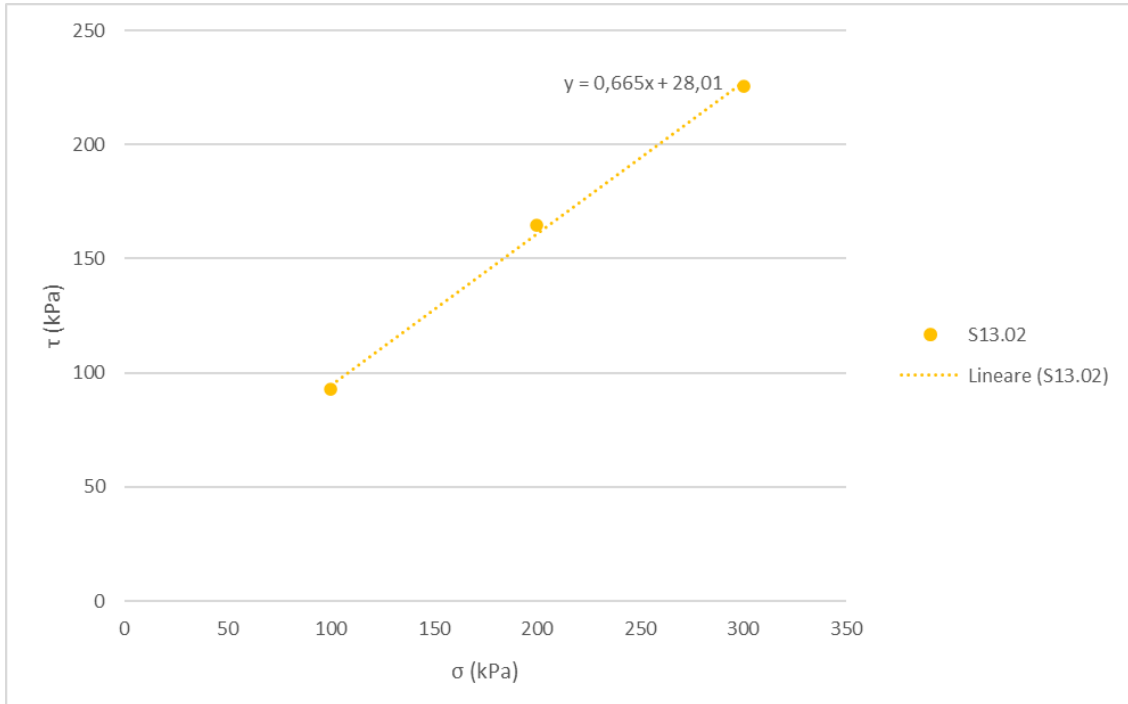


Figura 15: Prova taglio diretto - Sondaggio S13.02

6.6 PROVA A TRAZIONE INDIRECTA (PROVA BRASILIANA)

La prova a trazione indiretta viene eseguita su campioni estratti dal corpo diga. I valori riportati di seguito sono connessi al manufatto cementizio di matrice carbonatica e presentano un valore minimo pari a 4.6 N/mm² e un valore massima pari a 62.09 N/mm². Alcuni valori sono decisamente molto alti. Sono da considerare con prudenza.

| Campione | Profondità m | σ _t N/mm ² |
|----------|-----------------|-------------------------------------|
| S1.01 | 0,70-1,00 | 45,37 |
| | | 47,88 |
| | | 43,91 |
| S2.02 | 5,10-5,40 | 7,94 |
| | | 38,68 |
| | | 16,1 |
| S3.03 | 12,04-12,33 | 30,11 |
| | | 53,94 |
| | | 46 |
| S4.02 | 9,16-9,48 | 7,11 |



| | | |
|-------|-----------|-------|
| | | 8,57 |
| | | 4,6 |
| S5.01 | 0,71-0,98 | 8,99 |
| | | 62,09 |
| | | 6,9 |
| S6.01 | 1,29-1,55 | 6,69 |
| | | 5,85 |
| | | 58,75 |

Tabella 9 Prova a trazione indiretta

6.7 PROVA COMPRESSIONE MONOASSIALE

Prove di compressione monoassiale sono state eseguite su provini estratti presso la diga di Bunnari Basso e la zona frana. Ogni prova consiste nella determinazione della compressione monoassiale, del modulo secante e tangente e del coefficiente di Poisson.

Di seguito sono riportati i valori ottenuti per i vari provini e il riassunto per ciascuna unità in termini di valori medi.

| Campione | Quota | Macro | σ MPa | E_{sec50} MPa | E_{tan50} MPa | ν |
|----------|-------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------|
| S1.03 | 7,16-7,56 | Malta e clasti | 92,08 | | | |
| S1.00 | 6,70-6,95 | Vulcanite | 93,8 | | 50000 | 0,35 |
| S1.00 | 9,40-9,60 | Vulcanite | 79,2 | | 36363,64 | 0,27 |
| S1.01 | 4,45-4,90 | Vulcanite | 44,5 | | 36363,64 | 0,27 |
| S1.01 | 4,80-5,05 | Vulcanite | 34 | | 34285,71 | 0,26 |
| S1.02 | 1,80-2,00 | Vulcanite | 26,3 | | 35714,29 | 0,3 |
| S1.02 | 6,10-6,30 | Vulcanite | 41,2 | | 31250 | 0,25 |
| S2.03 | 12,18-12,45 | Malta e clasti | 15,16 | | | |
| S2.06 | 22,00-22,28 | Malta e clasti | 3,7 | | | |
| S2.00 | 13,50-13,80 | Vulcanite | 71 | | 46666,67 | 0,29 |
| S2.01 | 9,50-9,70 | Vulcanite | 90,9 | | 45000 | 0,3 |
| S2.01 | 9,80-10,00 | Vulcanite | 62,2 | | 37500 | 0,28 |
| S2.01 | 13,45-13,65 | Vulcanite | 34 | | 36000 | 0,27 |
| S2.01 | 18,60-18,70 | Vulcanite | 29,9 | | 8571,43 | 0,4 |
| S2.02 | 12,35-12,75 | Vulcanite | 42,3 | | 35000 | 0,26 |
| S2.03 | 7,40-7,65 | Vulcanite | 48,7 | | 17500 | 0,35 |
| S2.04 | 9,75-9,85 | Vulcanite | 19,4 | | 5833,33 | 0,38 |
| S2.04 | 14,53-14,83 | Malta e clasti | 41,12 | 12008 | 12034 | |
| S2.05 | 18,29-18,66 | Malta e clasti | 6,2 | | 12857,14 | 0,23 |
| S3.02 | 7,16-7,46 | Malta e clasti | 6,9 | | 13333,33 | 0,24 |
| S3.05 | 18,18-18,48 | Malta e clasti | 7,2 | | 18000 | 0,23 |
| S3.06 | 27,43-27,68 | Malta e clasti | 12,96 | | 28571,43 | 0,32 |
| S3.01 | 2,64-2,92 | Malta e clasti | 2,15 | 263 | 350 | |



| | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------------|--------|-------|----------|------|
| S3.04 | 17,63-18,00 | Malta e clasti | 26,39 | | | |
| S4.03 | 16,50-16,89 | Malta e clasti | 9,36 | 1542 | 1958 | |
| S4.05 | 28,41-28,74 | Malta e clasti | 5,7 | | 8000 | 0,17 |
| S4.04 | 23,55-23,87 | Malta e clasti | 36,46 | | | |
| S5.02 | 8,62-9,00 | Malta e clasti | 8,47 | | | |
| S5.03 | 11,65-12,00 | Malta e clasti | 3,7 | | 18750 | 0,32 |
| S5.04 | 18,27-18,60 | Malta e clasti | 4,25 | | 18000 | 0,2 |
| S5.03 | 11,65-12,00 | Malta e clasti | 5,34 | | | |
| S6.04 | 9,12-9,42 | Rocchia | 44,66 | 31582 | 33456 | |
| S6.02 | 4,00-4,39 | Malta e clasti | 5 | | 16666,67 | 0,25 |
| S6.05 | 14,34-14,65 | Malta e clasti | 12,69 | | 45205,48 | 0,38 |
| S6.03 | 5,45-5,85 | Malta e clasti | 14,48 | | | |
| S5.05 | 36,56-36,95 | Rocchia | 39,13 | 4131 | 9068 | |
| S6.02 | 26,30-26,65 | Vulcanite alterata | 1,6 | | 2500 | 0,47 |
| S1.01 C(II) | 12,60-12,80 | Malta e clasti | 84,6 | | 42105,26 | 0,25 |
| S1.06 | 15,20-15,62 | Malta e clasti | 10,84 | | | |
| S1.01 C(III) | 12,80-13,00 | Rocchia | 110,71 | 36198 | 36469 | |
| S1.04 | 10,00-10,36 | Malta e clasti | 4 | | 18333,33 | 0,33 |

Tabella 10 Prova a compressione monoassiale (corpo diga)

| Campione | Quota | Macro | σ | E_{sec50} | E_{tan50} | ν |
|----------|-------------|--------------------|----------|-------------|-------------|-------|
| | | | MPa | MPa | MPa | |
| S9.05 | 17,50-17,90 | Vulcanite compatta | 2,22 | | 15000 | 0,36 |
| S10.07 | 23,10-23,50 | Vulcanite compatta | 23,17 | | | |
| S11.07 | 23,40-23,90 | Vulcanite compatta | 30 | | 33333,33 | 0,27 |

Tabella 11 Prova a compressione monoassiale (zona frana)

| Zona | Unità geotecnica | σ | E_{sec50} | E_{tan50} | ν |
|------------|---|----------|-------------|-------------|-------|
| | | MPa | MPa | MPa | - |
| CORPO DIGA | Manufatto cementizio di matrice carbonatica | 31 | 11.350,0 | 25.300 | 0,28 |
| | Rocchia vulcanica (andesite) compatta | 42 | 20.100,0 | 21.700 | 0,35 |
| ZONA FRANA | Rocchia vulcanica (andesite) compatta | 19 | - | 24.100 | 0,31 |

Tabella 12 Prova a compressione monoassiale - Sintesi

6.8 POINT LOAD TEST

Trattasi di prove effettuate su provini prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi in corrispondenza del corpo diga sul manufatto cementizio di matrice carbonatica. In tabella sono riportate le resistenze a compressione estrapolate dai valori di I_s50 .

CORPO DIGA

MANDATARIA:

MANDANTI:



| Point Load Test | | | | | | | |
|-----------------|-------------|-----------|-------------------------|-------|------|------|--------|
| Campione | Profondità | Rottura P | Indice di Resistenza IS | De | F | IS50 | UCS |
| | | kN | MN/m ² | mm | | | MPa |
| S1.01B | 1,00 - 1,27 | 4,2 | 0,68 | 78,59 | 1,23 | 0,83 | 11,67 |
| S2.01B | 2,38-2,64 | 3,2 | 0,52 | 78,45 | 1,22 | 0,64 | 8,92 |
| S2.05B | 18,66-18,88 | 36 | 5,84 | 78,51 | 1,23 | 7,15 | 178,87 |
| S3.05B | 19,20-19,33 | 4,1 | 0,67 | 78,23 | 1,22 | 0,82 | 11,47 |
| S4.01B | 3,61-3,78 | 2 | 0,32 | 79,06 | 1,23 | 0,39 | 5,51 |
| S6.02B | 4,39-4,66 | 2,2 | 0,36 | 78,17 | 1,22 | 0,44 | 6,16 |

Tabella 13 Point Load Test

6.9 PROVE DI CARICO SU PIASTRA

Due prove di carico su piastre sono state eseguite in corrispondenza dei sondaggi S2000 e S1000 a valle della diga. Il carico massimo applicato nelle prove è stato di 2400 kPa. La prova S2000 ha mostrato terreni di qualità migliori rispetto a quelli del sondaggio S1000. I moduli elastici, come dalle figure riportate di seguito, mostrano una sensibile variabilità in funzione dello sforzo, tendendo a peggiorare al crescere di questo.

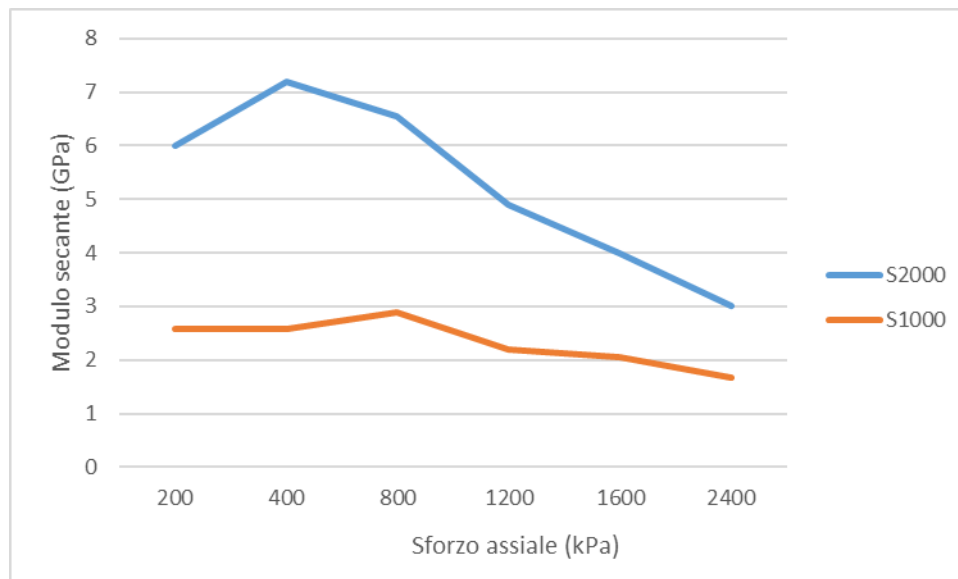


Figura 16: Sforzo assiale – Modulo secante

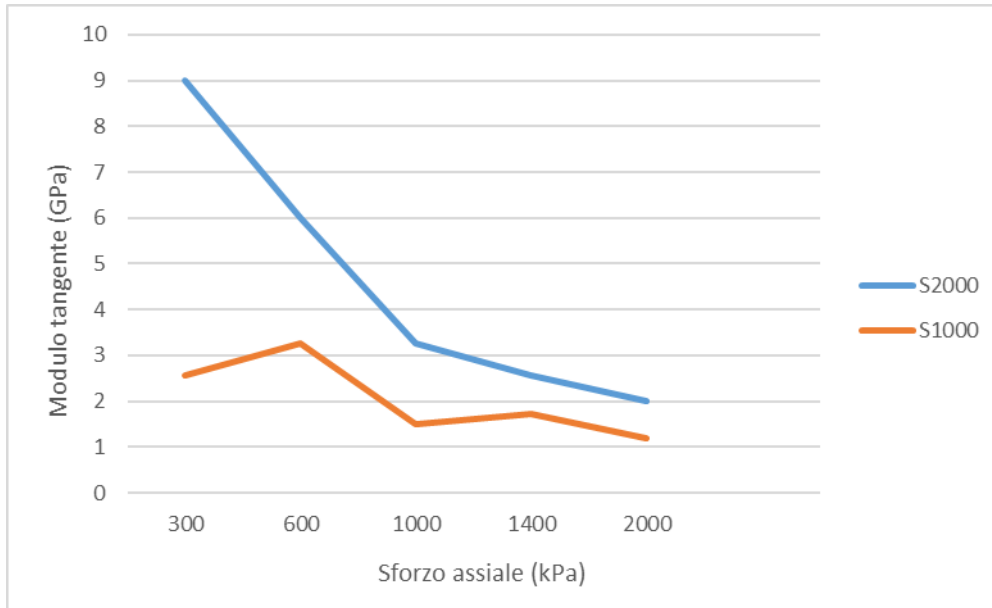


Figura 17: Sforzo assiale - modulo tangente

6.10 PROVE DI PERMEABILITÀ

6.10.3 Prove permeabilità Lugeon

Nel corso della campagna di indagine realizzate nel 2006 sono state eseguite 13 prove di permeabilità tipo Lugeon. La permeabilità della roccia misurata viene generalmente espressa in unità LUGEON; un LUGEON corrisponde alla permeabilità di un ammasso roccioso che assorbe 1 litro di acqua al minuto per ogni metro di foro, con una pressione di prova di 10 atm.

La prova è stata eseguita immettendo acqua in pressione in fori di sondaggio. Nel foro viene calato un tubo per l'adduzione dell'acqua munito di otturatore ad espansione che consente di isolare il tratto di foro da provare. Si procede ad iniettare nel tratto di prova, eseguendo 3 diversi gradini di pressione in salita e ripetendo gli stessi per i primi 2m in discesa, misurando per ciascun gradino le portate assorbite che determinano la stabilizzazione dell'assorbimento raggiunto.

Nel corso della prova si sono misurati:

- Pressione di iniezione
- Portata immessa
- Tempo di durata della prova dopo il raggiungimento delle condizioni di regime.

Di seguito vengono riportati i risultati per ciascuna prova eseguita.

| SONDAGGIO | PROFONDITA' | Coefficiente di permeabilità k (m/s) | | | | |
|-----------|-------------|--------------------------------------|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | | | | | | |



| | | | | | | |
|----|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| S1 | 0-5,00 | 5,00E-07 | 3,07E-07 | 3,06E-07 | 3,21E-07 | 2,40E-07 |
| | 5,00-10,00 | 1,88E-06 | 1,75E-06 | 1,75E-06 | 1,54E-06 | 1,71E-06 |
| | 10,00-15,00 | 4,26E-06 | 6,52E-06 | 5,25E-06 | 7,01E-06 | 8,90E-06 |
| | 15,00-20,00 | 4,72E-07 | 4,60E-07 | 4,60E-07 | 3,97E-07 | 3,51E-07 |
| | 20,00-25,00 | 2,24E-07 | 3,23E-07 | 3,58E-07 | 1,90E-07 | 1,44E-07 |
| | 25,00-30,00 | 7,55E-08 | 9,14E-08 | 1,29E-07 | 1,03E-07 | 8,24E-08 |
| | 30,00-35,00 | 1,16E-07 | 1,11E-07 | 1,21E-07 | 1,02E-07 | 1,03E-07 |
| | 35,00-40,00 | 8,20E-08 | 7,60E-08 | 7,59E-08 | 7,62E-08 | 6,78E-08 |
| S2 | 0-5,00 | 7,81E-07 | 7,25E-07 | 6,01E-07 | 5,97E-07 | 4,55E-07 |
| | 5,00-10,00 | 5,54E-07 | 4,46E-07 | 3,60E-07 | 2,87E-07 | 2,26E-07 |
| | 10,00-15,00 | 9,16E-07 | 7,56E-07 | 1,02E-06 | 6,58E-07 | 9,25E-07 |
| | 15,00-20,00 | 3,03E-08 | 7,38E-08 | 7,34E-08 | 4,87E-08 | 1,64E-08 |
| | 20,00-25,00 | 2,45E-08 | 3,43E-08 | 5,00E-08 | 3,61E-08 | 2,24E-08 |
| | 25,00-30,00 | 1,37E-06 | 1,83E-06 | 1,72E-06 | 1,34E-06 | 1,48E-06 |
| | 30,00-35,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 9,58E-08 | 1,19E-07 | 1,10E-07 |
| | 35,00-40,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,25E-08 | 5,85E-10 | 0,00E+00 |
| | 40,00-45,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 6,25E-09 | 9,32E-10 | 0,00E+00 |
| | 45,00-50,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,32E-08 | 6,01E-10 | 0,00E+00 |
| | 50,00-55,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 3,22E-09 | 7,25E-10 | 0,00E+00 |
| | 55,00-60,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,80E-10 | 0,00E+00 |
| S3 | 0-5,00 | 8,09E-07 | 8,22E-07 | 7,51E-07 | 8,52E-07 | 4,92E-07 |
| | 5,00-10,00 | 4,81E-07 | 4,00E-07 | 4,02E-07 | 3,66E-07 | 3,87E-07 |
| | 10,00-15,00 | 2,01E-07 | 2,45E-07 | 2,34E-07 | 2,06E-07 | 1,78E-07 |
| | 15,00-20,00 | 8,35E-08 | 8,65E-08 | 8,49E-08 | 8,07E-08 | 1,00E-07 |
| | 20,00-25,00 | 6,86E-08 | 9,60E-08 | 2,01E-07 | 1,73E-07 | 1,72E-07 |
| | 25,00-30,00 | 3,08E-06 | 2,71E-06 | 2,54E-06 | 2,49E-06 | 2,68E-06 |
| | 30,00-35,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,65E-09 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| | 35,00-40,00 | 0,00E+00 | 1,06E-09 | 2,74E-09 | 7,96E-10 | 0,00E+00 |
| S4 | 0-5,00 | 1,40E-06 | 8,46E-07 | 7,26E-07 | 7,41E-07 | 3,50E-07 |
| | 5,00-10,00 | 3,44E-07 | 3,49E-07 | 3,41E-07 | 3,57E-07 | 2,68E-07 |
| | 10,00-15,00 | 3,15E-07 | 3,77E-07 | 3,92E-07 | 4,11E-07 | 2,15E-07 |
| | 15,00-20,00 | 3,91E-07 | 3,50E-07 | 3,34E-07 | 3,45E-07 | 1,60E-07 |
| | 20,00-25,00 | 3,24E-08 | 4,57E-08 | 5,80E-08 | 4,10E-08 | 6,24E-09 |
| | 25,00-30,00 | 8,55E-07 | 8,95E-07 | 8,98E-07 | 8,99E-07 | 9,14E-07 |
| | 30,00-35,00 | 2,97E-06 | 2,74E-06 | 2,56E-06 | 2,69E-06 | 2,95E-06 |
| | 35,00-40,00 | 2,96E-06 | 2,61E-06 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| S5 | 0-5,00 | 1,34E-06 | 5,69E-07 | 2,11E-07 | 7,16E-07 | 6,29E-07 |
| | 5,00-10,00 | 4,15E-07 | 3,58E-07 | 3,41E-07 | 3,15E-07 | 2,66E-07 |
| | 10,00-15,00 | 3,04E-07 | 2,99E-07 | 2,75E-07 | 2,28E-07 | 1,67E-07 |
| | 15,00-20,00 | 1,42E-06 | 1,19E-06 | 9,81E-07 | 9,51E-07 | 6,43E-07 |
| | 20,00-25,00 | 4,96E-07 | 4,60E-07 | 5,57E-07 | 4,32E-07 | 3,81E-07 |
| | 25,00-30,00 | 1,57E-06 | 1,80E-06 | 1,78E-06 | 1,90E-06 | 1,84E-06 |
| | 30,00-35,00 | 2,76E-06 | 2,49E-06 | 2,56E-06 | 2,36E-06 | 2,13E-06 |



| | | | | | | |
|------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 35,00-40,00 | 2,31E-06 | 2,01E-06 | 1,71E-06 | 1,99E-06 | 2,25E-06 |
| | 40,00-45,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| | 45,00-50,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| | 50,00-55,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,10E-09 | 6,35E-10 | 0,00E+00 |
| | 55,00-60,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 2,93E-09 | 3,39E-10 | 0,00E+00 |
| S6 | 0-5,00 | 4,40E-07 | 6,14E-07 | 6,61E-07 | 7,13E-07 | 4,67E-07 |
| | 5,00-10,00 | 3,86E-07 | 3,99E-07 | 3,96E-07 | 4,12E-07 | 2,68E-07 |
| | 10,00-15,00 | 3,27E-07 | 3,52E-07 | 3,60E-07 | 3,81E-07 | 3,80E-07 |
| | 15,00-20,00 | 2,39E-07 | 3,74E-07 | 4,10E-07 | 4,27E-07 | 4,44E-07 |
| | 20,00-25,00 | 4,83E-08 | 5,26E-08 | 5,58E-08 | 4,64E-08 | 3,93E-08 |
| | 25,00-30,00 | 7,54E-08 | 7,40E-08 | 7,59E-08 | 7,47E-08 | 7,26E-08 |
| | 30,00-35,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 5,56E-10 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |
| | 35,00-40,00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,22E-09 | 7,74E-10 | 0,00E+00 |
| S101 | 5,00-10,00 | 2,98E-08 | 3,96E-08 | 3,70E-08 | 2,37E-08 | 1,46E-08 |
| | 20,00-25,00 | 2,98E-08 | 3,96E-08 | 3,70E-08 | 2,37E-08 | 1,46E-08 |
| | 25,00-30,00 | 5,25E-07 | 4,30E-07 | 3,62E-07 | 3,78E-07 | 3,95E-07 |
| S102 | 5,00-10,00 | 8,38E-06 | 6,10E-06 | 4,91E-06 | 5,72E-06 | 8,09E-06 |
| | 15,00-20,00 | 6,48E-06 | 4,01E-06 | 3,84E-06 | 3,58E-06 | 5,81E-06 |
| SA | 0-5,00 | 7,89E-06 | 6,57E-06 | 5,45E-06 | 7,19E-06 | 7,01E-06 |
| SB | 5,00-10,00 | 4,58E-06 | 3,87E-06 | 3,49E-06 | 3,91E-06 | 4,50E-06 |
| | 15,00-20,00 | 7,35E-08 | 1,82E-07 | 1,96E-07 | 1,84E-07 | 1,57E-07 |
| SC | 0-5,00 | 6,25E-07 | 4,42E-07 | 3,66E-07 | 3,80E-07 | 5,24E-07 |
| | 5,00-10,00 | 4,63E-06 | 3,86E-06 | 3,82E-06 | 3,38E-06 | 3,92E-06 |
| | 10,00-15,00 | 2,06E-06 | 2,24E-06 | 2,22E-06 | 2,36E-06 | 2,47E-06 |
| | 15,00-20,00 | 8,42E-07 | 9,31E-07 | 1,13E-06 | 1,08E-06 | 1,01E-06 |
| SD | 0-5,00 | 6,01E-06 | 4,44E-06 | 3,61E-06 | 3,35E-06 | 4,67E-07 |
| | 5,00-10,00 | 4,07E-06 | 3,58E-06 | 3,64E-06 | 3,59E-06 | 4,03E-06 |

Tabella 14 Prove di permeabilità Lugeon

Sulle base delle prove effettuate è stato possibile pertanto classificare la permeabilità dei materiali che costituiscono il manufatto e il piano di appoggio del corpo diga. I coefficienti di permeabilità vengono riportati nella tabella seguente.

| Unità Geotecnica | Coefficiente di permeabilità k (m/s) | | | | | Valore medio k (m/s) |
|--------------------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| Manufatto | 9,40E-07 | 8,04E-07 | 7,56E-07 | 7,30E-07 | 6,05E-07 | 7,67E-07 |
| Vulcanite con argillificazione | 9,64E-08 | 1,24E-07 | 1,28E-07 | 1,03E-07 | 1,08E-07 | 1,12E-07 |
| Vulcanite compatta | 2,19E-06 | 2,05E-06 | 1,61E-06 | 1,78E-06 | 2,21E-06 | 1,97E-06 |
| Dacite | 3,98E-06 | 3,35E-06 | 2,30E-06 | 3,43E-06 | 3,90E-06 | 3,39E-06 |
| Vulcanite alterata | 4,07E-07 | 4,04E-07 | 3,93E-07 | 3,22E-07 | 2,97E-07 | 3,65E-07 |

Tabella 15 Coefficiente di permeabilità



Il coefficiente di permeabilità della muratura della diga è dell'ordine di $8.0E-07$ m/s, mentre quello della roccia vulcanica varia generalmente tra $1.0E-07$ m/s a $3.0E-06$ m/s.

6.10.4 Prove permeabilità Lefranc

Durante le perforazioni dei sondaggi nella zona della frana sono state eseguite 2 prove di permeabilità tipo "Lefranc" a carico costante e una prova a carico costante, allo scopo di misurare la conducibilità idraulica orizzontale del terreno. La prova Lefranc è stata eseguita secondo le seguenti fasi d'esecuzione:

1. Perforazione con carotiere fino alla quota di prova;
2. Rivestimento del foro fino alla quota raggiunta dalla perforazione;
3. Sollevamento del rivestimento di 50 cm;
4. Inserimento ghiaietto per uno spessore di circa 60 cm;
5. Esecuzione della prova:
 - A carico costante:
 1. Immissione d'acqua nella batteria di rivestimento fino boccaforo;
 2. Mantenimento del livello d'acqua a boccaforo costante nel tempo;
 3. Misura delle portate assorbite ogni 5 minuti per un totale di 30 minuti.
 - A carico variabile:
 1. Immissione d'acqua nella batteria di rivestimento fino boccaforo;
 2. Sospensione dell'immissione;
 3. Misura degli abbassamenti nel tempo sino ad esaurimento.

Sulle base delle prove effettuate è stato possibile classificare la permeabilità delle vulcaniti argillificate che costituiscono la zona frana. I coefficienti di permeabilità raggiungono valori di circa $1.85E-05$ – $6.9E-06$ m/s.

7 INDAGINI GEOFISICHE

Nella campagna di indagine svolte nel 2004, le misure di velocità delle onde P sono state eseguite su 10 provini cilindrici ricavati dai carotaggi. Il valore medio delle 10 velocità misurate in laboratorio è di 3600 m/s. In aggiunta si sono eseguite 18 tomografie sismiche cross-hole, che tagliano il corpo diga da paramento a paramento, secondo piani verticali con azimuth variabile rispetto a un piano verticale perpendicolare alla diga. L'esame delle sezioni mette in luce una situazione relativamente omogenea, con valori di velocità contenuti nell'intervallo 2400-3200 m/s, con un valore medio pari a 2800 m/s che può essere considerato buono. Non si trovano variazioni repentine o chiare nel passaggio da un'unità all'altra. Di seguito si riportano il valore medio di velocità in m/s per ciascun pannello.

MANDATARIA:

MANDANTI:



| Pannello | Vm (m/s) |
|----------|----------|
| GV1 – M1 | 2800 |
| GV2 – M1 | 3000 |
| GV2 – M2 | 2900 |
| GV3 – M2 | 3000 |
| GM3 – V2 | 2700 |
| GV3 – M3 | 3000 |
| GM3 - V3 | 3200 |
| GV4 – M3 | 2600 |
| GV4 – M4 | 2800 |
| GM3 – V4 | 2600 |
| GM3 – V5 | 2600 |
| GM5 – V2 | 2700 |
| GM5 – V3 | 2500 |
| GV5 – M4 | 3200 |
| GM5 – V4 | 2800 |
| GV5 – M5 | 2900 |
| GM5 – V5 | 2400 |
| GV6 – M5 | 3000 |

Tabella 16 Tomografia sismica del corpo diga – valori medi di velocità di propagazione delle onde compressionali

Successivamente nella campagna di indagine del 2006, le misure di velocità delle onde P sono state eseguite su 23 provini cilindrici ricavati dai carotaggi. Per ciascuna unità geotecnica vengono riportate oltre alle misure della velocità di propagazione delle onde P anche il modulo di Young.

| Unità Geotecnica | Vp (m/s) | E (GPa) |
|-----------------------------|----------|---------|
| Roccia Vulcanica (dacite) | 4622 | 40.1 |
| Roccia Vulcanica (andesite) | 3871 | 35.7 |

Tabella 17 Velocità delle onde P eseguiti in laboratorio (campagna di indagine 2006)



8 CONCLUSIONI

Le indagini realizzate tra il 2004 e il 2006 dalla ditta ICEIA srl di Cagliari hanno permesso di definire le principali caratteristiche meccaniche ed idrauliche dei terreni e delle rocce in corrispondenza dell'imposta della diga e nella zona descritta come franosa in sponda sinistra a valle del secondo sfioratore.

Poiché gli interventi interessati della presente fase di progettazione prevedono una dismissione della diga, con la realizzazione di una galleria di by-pass idraulico collocata nell'ammasso roccioso in sponda sinistra della diga, si rende necessario la realizzazione di una nuova campagna di indagini.

Questa nuova campagna si concentrerà nella caratterizzazione dei terreni e ammassi in corrispondenza delle nuove opere. Essa comprenderà quindi sondaggi, prove in foro, prove su campioni in laboratorio e geofisica nelle zone seguenti:

- Per la galleria, lungo il suo tracciato ed in corrispondenza degli imbocchi di monte e di valle ed in corrispondenza della vasca di dissipazione a valle;
- Per l'argine di ritenuta idraulica, in corrispondenza della sua impronta;
- Per l'edificio filtri, vicino alle sue fondazioni perimetrali.

Infine, nuove indagini geognostiche e geofisiche saranno realizzate in corrispondenza del suddetto versante in frana. Esse dovranno consentire di individuare la presenza o no di un corpo di frana in movimento, la cui presenza, se fosse riscontrata, necessiterà di opere di stabilizzazione di versante relativamente significative. Quindi, oltre alle indagini classiche di caratterizzazione, andranno installati piezometri ed inclinometri, la cui lettura dovrà essere realizzata a cadenza regolare durante tutto il periodo della progettazione.