

Regione Autonoma della Sardegna
Assessorato dell'Agricoltura e Riforma Agro-Pastorale



CONSORZIO DI BONIFICA DELL'ORISTANESE
ORISTANO



PROGETTO ESECUTIVO

CUP - CAT. P0418

*Interventi di manutenzione straordinaria per la messa in sicurezza
dello sbarramento collinare in localita' "Mura Cabonis"
in agro di Milis*

Elaborato:

Relazione geologica

All. C.1

n° prog.

Coordinatore per la progettazione
ing. Massimo Sanna

V.il Resp. del procedimento
ing. Roberto Sanna

Gruppo di progettazione
Studio Chiarini Associati
ing. Gian Luca Zuddas
geol. Simone Manconi
ing. Andrea Murrancu

Scala

Data luglio 2021

Rev. 3

INDICE

1.	Premessa.....	3
2.	Analisi del quadro di riferimento progettuale	4
3.	Analisi dello stato attuale e riferimenti normativi	8
4.	Ubicazione dell'area in esame	12
5.	L'indagine.....	13
6.	Inquadramento Geologico.....	15
7.	Inquadramento Geomorfologico.....	47
8.	Inquadramento Geopedologico	48
9.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea	48
10.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lugeon.....	49
11.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lefranc.....	53
12.	Considerazioni conclusive.....	58

1. Premessa

Nell'ambito del Programma di sviluppo rurale 2014-2020 – Reg. (UE) n. 1305/2013 – Misura 4 “Investimenti in immobilizzazioni materiali” – Sottomisura 4.3 “Sostegno a investimenti nell'infrastruttura necessaria allo sviluppo, all'ammodernamento e all'adeguamento dell'agricoltura e della silvicoltura” – Tipo di intervento 4.3.2 “Efficientamento delle reti e risparmio idrico” – bando 2017 – procedura di autorizzazione alla prosecuzione dell'esercizio ex Art. 25 dell'Allegato A – L.R. 12/2017, è stato conferito incarico allo scrivente Dott. Geol. Simone Manconi, iscritto al n° 513 dell'Ordine dei Geologi della Sardegna per la redazione della relazione geologica e geotecnica a supporto degli interventi previsti.

La presente relazione avrà cura di esaminare le questioni di carattere geologico e geotecnico connesse con il progetto definitivo ed esecutivo relativo alle opere e interventi per la messa in sicurezza della Diga di Mura Cabonis in territorio di Milis (OR).

L'analisi dei caratteri geologici e geotecnici dei terreni interessati dall'intervento verrà eseguita mediante la programmazione e l'esecuzione di una serie di indagini, sia dirette sia indirette, che verranno eseguite in corrispondenza dell'area d'intervento per ottenere elementi conoscitivi di dettaglio a supporto degli interventi progettuali previsti.

La presente, per quanto di competenza, viene redatta in risposta alla richiesta di integrazioni trasmesse dall'Assessorato ai Lavori Pubblici della Regione Autonoma della Sardegna – Direzione Generale – Servizio Opere Idriche e Idrogeologiche Prot. 43530 del 11.12.2019 e Prot. 6914 del 28.02.2019. In particolare verrà dato riscontro in merito alla ricostruzione del modello geologico e geotecnico del sito, mediante l'elaborazione delle sezioni geotecniche dell'area di invaso e dello sbarramento in riferimento ai contenuti di cui al capitolo 6 del D.M. 17 gennaio 2018 “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”.

A tal riguardo verranno illustrati i risultati delle indagini sui terreni costituenti il corpo diga e la fondazione attraverso la loro caratterizzazione geotecnica, estesa fino a profondità idonee all'opera, utili alla definizione delle condizioni di sicurezza delle sponde e delle spalle e alla verifica delle scelte progettuali mediante il controllo del comportamento dell'opera nel suo insieme.

Alla presente verranno allegati inoltre i rapporti di prova eseguite sui materiali, le verifiche sulla capacità portante e i cedimenti, le verifiche di sicurezza delle opere di sbarramento e di quelle connesse, con particolare riferimento all'intervento di ripristino delle condizioni di impermeabilità originarie dello sbarramento mediante iniezioni.

Nell'ambito delle direttive progettuali verranno sviluppati gli elaborati tecnici che illustreranno dimensionalmente l'intervento di ripristino delle condizioni di impermeabilità dello sbarramento mediante iniezioni.

Nella presente verranno esposti i calcoli e i criteri di progettazione per il dimensionamento dell'intervento e in particolare per quanto riguarda le verifiche di sicurezza e la funzionalità ex-ante

ed ex-post, la tipologia di iniezioni, le pressioni, le caratteristiche prestazionali e descrittive dei materiali prescelti, evidenziando altresì gli accorgimenti gestionali dell'invaso che saranno posti in essere durante l'esecuzione delle opere.

2. Analisi del quadro di riferimento progettuale

La diga di Mura Cabonis è uno sbarramento di ritenuta costruito durante gli anni 50', utilizzato essenzialmente per scopi irrigui.

L'invaso è stato realizzato per captare le acque relative al proprio bacino imbrifero relativo al Rio e Sa Tanca (circa 0.06 Km²) sia le acque derivanti da un'opera di presa sul Rio Cannargia che a sua volta più a monte riceve le acque del Rio Crispi mediante una condotta di collegamento.

Lo sbarramento risulta inoltre alimentato dalle acque prelevate dal canale adduttore in destra Tirso mediante una condotta in pressione.

Il corpo del rilevato che costituisce la diga è stato realizzato in materiale sciolto scarsamente permeabile (argilla) con materiale semi permeabile sistemato in aderenza sia sul paramento di monte sia sul paramento di valle.



Fig.1: Inquadrimento aerofotogrammetrico area d'intervento

Recentemente, negli ultimi anni (dagli anni '90 per precisione), sono state rilevate delle copiose emergenze d'acqua sul paramento di valle alle quali si è provveduto con dei ripristini locali di argilla, i quali tuttavia non si sono rilevati risolutivi.



Fig.2: Ripresa fotografica del paramento di valle con ubicazione delle emergenze



Fig.3: Ripresa fotografica delle emergenze sul paramento di valle



Fig.4: Ripresa fotografica delle emergenze sul paramento di valle



Fig.5: Ripresa fotografica delle emergenze sul paramento di valle



Fig.6: Ripresa fotografica delle emergenze sul paramento di valle

Pertanto, a fronte di una condizione di evidente dissesto dovuta dalle venute d'acqua con possibili effetti di dam-break per rottura del paramento di valle, è stata prevista un'indagine accurata dell'intero corpo del rilevato a partire dal coronamento, avente l'obiettivo di stabilire se risulti opportuno consolidare definitivamente lo sbarramento da un punto di vista statico e ripristinare le condizioni di impermeabilità iniziali del corpo diga.

A tal fine, considerato che lo stato attuale dello sbarramento non permette la posa in opera di teli impermeabili per la presenza di conci di roccia basaltica su tutta la superficie del paramento di monte che porterebbero ad una lacerazione del telo in HDPE, si è optato per un intervento che possa ripristinare le condizioni di impermeabilità del corpo del rilevato e nel contempo migliorare la condizione statica della diga.

A tal fine, la scelta progettuale consiste nella realizzazione di un sistema che possa garantire oltre che il ripristino delle condizioni di impermeabilità anche un'azione di consolidamento dell'intero corpo del rilevato.

Un'opzione valida e praticata in altri invasi è certamente rappresentata dalla tecnica di consolidamento e sistemazione del paramento di monte mediante la stesa di conglomerato

bituminoso previa realizzazione di un diaframma in calcestruzzo, da realizzarsi al piede del paramento di monte.

3. Analisi dello stato attuale e riferimenti normativi

Gli argini in terra sono opere costituite da rilevati strutturali che in genere presentano altezze considerevoli rispetto alla quota iniziale del terreno (piano di campagna), con la funzione di «tenuta» idraulica dell'acqua.

La realizzazione degli argini pone molteplici problemi di carattere generale, legati per lo più alla altezza delle opere, quindi al loro peso alle dimensioni trasversali con relativi vincoli geometrici, alla reperibilità di materiale per la costruzione dell'opera stessa, agli aspetti idraulici.

Gli argini in terra tra cui ricadono anche le dighe in materiali sciolti, sono generalmente realizzati con un rilevato in terra omogenea. Il materiale è di solito terra a granulometria fine classificata A6 o A4 nel sistema di classificazione CNRUNI 10006.

La permeabilità che si attende nella costruzione dell'argine con le terre dianzi indicate è non superiore a $10^{-6} \div 10^{-8}$ m/s per contenere i fenomeni di filtrazione ed un elevato peso di volume per assicurare la stabilità al franamento.

Appare evidente che eventuali problemi idraulici e strutturali del corpo del rilevato devono essere esaminati con particolare scrupolo, al fine di intervenire con le adeguate contromisure per la risoluzione di queste tematiche.

In linea di principio, la buona norma costruttiva ha sempre suggerito che la forma della sezione trasversale dell'argine con la pendenza più dolce verso campagna è dettata dalla necessità di mantenere la linea di filtrazione ma anche di contenere il pericolo di sifonamento oltre a garantire la stabilità dell'opera rispetto alla possibilità di franamento verso campagna.

In particolare, per la realizzazione delle arginature è sempre stata indicata una pendenza di 1:2 verso il paramento di valle e di 1: 1.5 ÷ 1.2 verso il lato bagnato (paramento di monte).

Per quanto concerne la realizzazione del terrapieno, particolare attenzione viene data soprattutto allo sviluppo della linea piezometrica o di saturazione, la cui risultante deve sempre corrispondere al livello posto al di sotto del rilevato arginale, in modo da evitare fenomeni di sifonamento e contestuali rotture arginali.

In effetti, la linea di saturazione deve essere sempre calcolata in modo tale da tenerla lontana dal paramento di valle, tant'è che esso viene realizzato generalmente con pendenze complessive minori per allungare i percorsi idrici.

Generalmente la classica regola empirica stabilisce che la linea di saturazione debba avere pendenze dell'ordine di $1/5 \div 1/7$.

In merito a quelle che sono state le analisi topografiche di dettaglio e le modellazioni idrauliche e statiche eseguite è stato proposto il seguente modello che rappresenta le condizioni dello sbarramento in condizioni ex-ante ed ex-post.

Nella condizione *ex-ante* le caratteristiche dello sbarramento di Mura-Cabonis possono essere così rappresentate:

- quota del coronamento:	116.85 m slm
- quota sfioratore:	115.84 m slm
- quota di massimo invaso:	116.33 m slm
- quota di minima regolazione:	108.65 m slm
- quota piede di valle/fondo lago:	107.30 m slm
- altezza diga:	9.55 m
- quota iniziale del canale fuggatore:	114.48 m slm

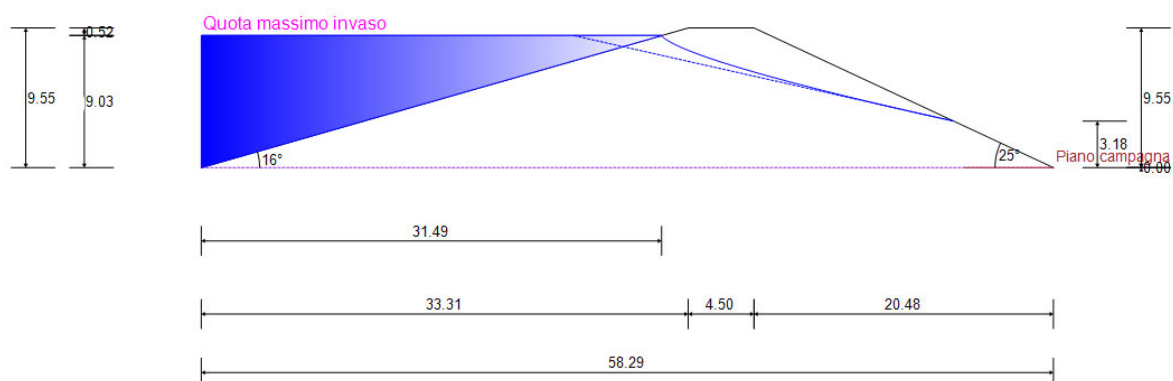


Fig.7: Rappresentazione schematica della linea di saturazione per la Diga di Mura Cabonis

Nella condizione *ex-post* le caratteristiche dello sbarramento di Mura-Cabonis possono essere così rappresentate:

- quota del coronamento:	117.25 m slm
- quota sfioratore:	114.86 m slm
- quota di massimo invaso:	115.75 m slm
- quota di minima regolazione:	108.65 m slm

- quota piede di valle/fondo lago:	107.30 m slm
- altezza diga:	9.95 m
- quota iniziale del canale fuggatore:	113.85 m slm
- quota finale del canale fuggatore:	103.50 m slm

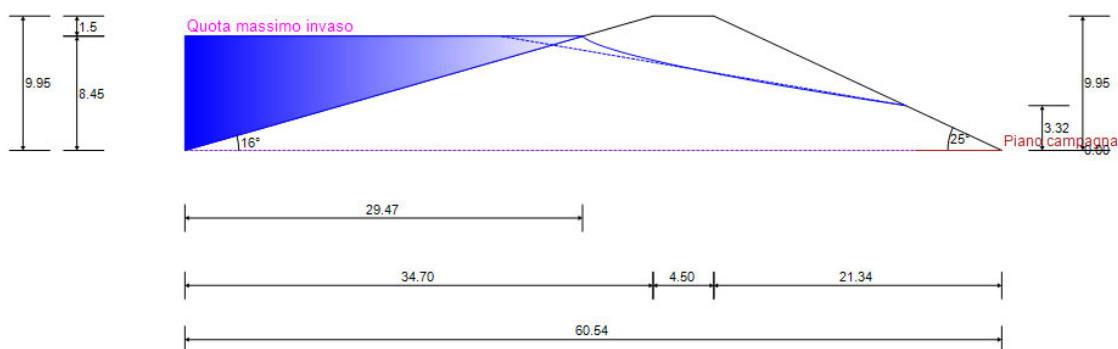


Fig.8: Rappresentazione schematica della linea di saturazione per la Diga di Mura Cabonis

Relativamente alla tipologia di intervento, risulta necessario rifarsi alle Norme Tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse).

Nello specifico, considerato che trattasi di una diga esistente, ci si riferirà alla parte H delle NTC, il cui ambito di applicazione è relativo a interventi di riparazione, lavori di miglioramento e adeguamento, nonché in tutti i casi in cui le disposizioni di legge o di regolamento prevedano verifiche di sicurezza delle dighe esistenti salvo quanto disposto dal comma 3 delle NTC.

Secondo quanto disposto dal quadro H delle NTC sulle Dighe, è definita diga esistente quella che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, la struttura completamente realizzata.

Nel caso di interventi non strutturali dovrà essere valutata la loro possibile influenza sugli SLU e gli SLE della diga o di parti di essa.

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle dighe esistenti devono essere conformi ai criteri generali stabiliti dalle vigenti NTC ed in particolare devono essere basate sulle informazioni, le indagini e le misure acquisite nel corso della costruzione e dell'esercizio della diga e su quelle acquisite a seguito di specifiche indagini per identificare le condizioni attuali dell'opera.

Le dighe esistenti dovranno essere sottoposte a valutazione della sicurezza dell'intera struttura o di parti di essa quando ricorrono le condizioni generali stabilite dalle NTC o dal Regolamento per la disciplina del procedimento di approvazione dei progetti e del controllo sulla costruzione e l'esercizio degli sbarramenti di ritenuta.

La valutazione della sicurezza di uno sbarramento può riguardare la stabilità legata al comportamento del corpo diga, tenuto conto delle condizioni geologiche ed idrologiche, nei suoi aspetti strutturali, geotecnici, inclusa la risposta alle azioni sismiche, ed idraulici.

La valutazione della sicurezza dovrà effettuarsi ogni qual volta si eseguano gli interventi strutturali e dovrà determinare il livello di sicurezza prima e dopo l'intervento.

Tra le tipologie di intervento previste dalle NTC, sono state individuate le seguenti categorie:

1. interventi di ristrutturazione mediante lavori e opere di trasformazione anche parziale
 - di adeguamento, atti a conseguire i livelli di sicurezza e funzionalità previsti dalle presenti norme per le nuove realizzazioni;
 - di miglioramento atti ad aumentare la sicurezza preesistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti per le nuove realizzazioni; l'incremento della sicurezza da conseguire deve essere adeguatamente dimostrato in progetto;
 - di riparazione o interventi locali che interessino elementi isolati e che, comunque, comportino miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti;
 - di declassamento, con riduzione dell'altezza della diga e/o del volume di invaso del serbatoio;
2. interventi di dismissione per privare lo sbarramento della funzione di ritenuta idraulica, garantendo la sicurezza del sito e dei territori di valle.

Nell'ambito degli interventi di adeguamento è fatto obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, ad interventi di adeguamento in caso di:

- a) sopraelevazione della diga e/o significativi incrementi delle quote idriche di progetto;
- b) variazioni di classe d'uso e/o variazioni di utilizzo della risorsa che comportino significativi incrementi dei carichi di progetto di cui al precedente cap. C;
- c) interventi strutturali per trasformare la diga mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un'opera dal comportamento strutturale diverso dal precedente.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intero sbarramento di ritenuta.

In linea di principio, come rilevato in precedenza, si tratta di un intervento locale o riparazione abbinato ad un declassamento dell'opera.

Pertanto, in caso di riparazione o ripristino delle condizioni di permeabilità come il caso in esame, gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi dello sbarramento e interesseranno porzioni limitate della diga.

Quindi, il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati, per documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, esse comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Considerato che il corpo diga è costituito da materiali sciolti, le norme tecniche specificano chiaramente che si dovranno accertare, mediante prove in sito ed in laboratorio su campioni prelevati dal corpo diga, le caratteristiche dei materiali componenti e la loro variabilità nell'ambito del corpo diga stesso, ricostruendo la situazione di fatto. Dovranno essere altresì identificati i fenomeni di filtrazione attraverso il corpo diga e in fondazione.

Per le dighe esistenti progettate e realizzate nel rispetto di previgenti norme tecniche, a completamento del quadro conoscitivo, dovranno essere accertate ed esaminate le difformità costruttive rispetto alle prescrizioni od obblighi imposti dalle presenti norme per le dighe di nuova costruzione. L'esame dovrà evidenziare gli elementi di vulnerabilità per la sicurezza dello sbarramento. Fermo restando quanto di seguito stabilito per il franco idraulico, difformità rispetto a prescrizioni costruttive potranno ammettersi ove giustificate sulla base di un quadro conoscitivo globale sufficientemente approfondito e sulla base di specifici piani di controllo e manutenzione periodici. In particolare eventuali condotte attraversanti dighe di materiali sciolti o di muratura di pietrame potranno essere ammessi solo se le relative condizioni di manutenzione / tenuta / funzionalità siano periodicamente accertate mediante specifici controlli.

In riferimento a quanto stabilito dalle metodologie d'analisi sismica da condurre per le dighe in materiali sciolti, la norma stabilisce espressamente che le analisi della risposta meccanica di queste dighe per effetto dell'azione sismica devono comprendere la valutazione degli spostamenti, in particolare dei cedimenti del coronamento, per rendere possibile le verifiche di sicurezza nei confronti della tracimazione.

In particolare la presenza di materiali scarsamente addensati e saturi, nel corpo diga o nel terreno di fondazione, richiede anche una verifica nei confronti della liquefazione.

Nel caso di dighe strategiche è sempre richiesta un'analisi dinamica. La scelta dello specifico tipo di analisi dinamica dipende sia dal tempo di ritorno dell'azione sismica considerata, sia dalle caratteristiche geotecniche dei materiali presenti.

4. Ubicazione dell'area in esame

L'area interessata dall'intervento ricade in territorio della Provincia di Oristano e precisamente nel Comune di Milis.

Nell'eseguire i lavori relativi all'ubicazione, alla caratterizzazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica, si è fatto riferimento alla seguente cartografia:

- Foglio n. 514 "Cuglieri", dell'I.G.M.I. (scala 1:50.000);
- Foglio n. 515 "Ghilarza", dell'I.G.M.I. (scala 1:50.000);
- Foglio n. 514, sez. II "San Vero Milis, dell'I.G.M.I. (scala 1:25.000);
- Foglio n. 515, sez. III "Paulilatino", dell'I.G.M.I. (scala 1:25.000);
- Foglio n. 514, sez. 120 "Seneghe", CTR (scala 1:10.000);
- Foglio n. 515, sez. 090 "Santa Cristina", CTR (scala 1:10.000);
- Cartografia catastale comunale (1:2.000);
- Ortofoto Digitali Georeferenziate (1:10.000);
- Piano Urbanistico Comunale (P.U.C.) Comune di Milis;
- Piano Paesaggistico Regionale (P.P.R.);
- Piano Regionale Attività estrattive (P.R.A.E.);
- Piano Forestale della Sardegna (P.F.R.S.);
- Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.);
- Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (P.S.F.F.);
- Art. 30 ter N.A. PAI;
- Reticolo idrografico RAS;
- Carta Uso del Suolo Regione Sardegna (2008);
- Parco Geominerario Storico ed Ambientale Regione Sardegna;
- Carte Perimetrazioni Aree S.I.C.;
- Carte Perimetrazioni Aree Z.P.S.;
- Carta Geologica della Sardegna;
- D.T.M. 10 m Regione Sardegna;
- D.T.M. 1 m Regione Sardegna;
- Elaborati Progettuali

5. L'indagine

L'indagine ha avuto l'obiettivo di analizzare nel dettaglio le caratteristiche geologiche, geotecniche e idrogeologiche del corpo diga nelle condizioni attuali.

In particolare verrà dato riscontro in merito alla ricostruzione del modello geologico e geotecnico del sito in riferimento ai contenuti di cui al capitolo 6 del D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni".

A tal fine verranno illustrati i risultati delle indagini geognostiche eseguite in corrispondenza del corpo diga e a valle dello stesso. Alla presente verranno inoltre allegati i rapporti di prova delle indagini di laboratorio eseguite sui materiali costituenti il rilevato arginale.

Come richiesto dal servizio opere idrauliche e idrogeologiche della Regione Sardegna, verrà dato risalto alle verifiche di sicurezza delle opere di sbarramento e di quelle connesse, con particolare riferimento all'intervento di impermeabilizzazione mediante iniezioni.

Come previsto dal D.M. 17.01.2018, le scelte di progetto, i calcoli e le verifiche verranno impostati sulla caratterizzazione geotecnica del sottosuolo ottenuta per mezzo di rilievi, sondaggi, indagini e prove.

In riferimento a quanto previsto dall'art. 24 e 26 del D.P.R. 207/2010 – comma 1 lettera A-D, l'analisi geologico-tecnica è articolata secondo i seguenti punti:

La relazione geologica comprende, sulla base di specifiche indagini geologiche, la identificazione delle formazioni presenti nel sito, lo studio dei tipi litologici, della struttura e dei caratteri fisici del sottosuolo, definisce il modello geologico del sottosuolo, illustra e caratterizza gli aspetti stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici, nonché il conseguente livello di pericolosità geologica;

La relazione geotecnica definisce, sulla base del modello geologico ed alla luce di specifiche indagini, scelte in funzione del tipo di opera e delle modalità costruttive, il modello geotecnico del volume del terreno influenzato, direttamente o indirettamente, dalla costruzione del manufatto e che a sua volta influenzerà il comportamento del manufatto stesso.

Illustra inoltre i procedimenti impiegati per le verifiche geotecniche, per tutti gli stati limite previsti dalla normativa tecnica vigente, che si riferiscono al rapporto del manufatto con il terreno, e i relativi della risposta sismica locale.

La relazione geotecnica deve inoltre comprendere l'illustrazione delle indagini effettuate, e a tal fine, dei procedimenti adottati e dei risultati ottenuti.

Nel complesso, il lavoro si è sviluppato secondo i seguenti punti:

- Inquadramento Geologico
- Inquadramento Geomorfologico
- Inquadramento Geopedologico
- Inquadramento Idrogeologico superficiale
- Inquadramento Idrogeologico sotterraneo
- Modello geologico del sottosuolo
- Modello geotecnico del sottosuolo
- Classificazione sismica dell'area d'intervento
- Verifica di sicurezza del rilevato arginale secondo NTC 2018

- Verifica di stabilità del rilevato arginale secondo NTC 2018
- Interventi di messa in sicurezza e consolidamento del rilevato arginale

6. Inquadramento Geologico

Il settore oggetto di intervento, è localizzato nella parte settentrionale della Fossa Tettonica del Campidano, interrotta trasversalmente dal complesso vulcanico basaltico del Plio-Quaternario.

L'area oggetto di intervento, è caratterizzata da una distribuzione degli affioramenti piuttosto eterogenea: di fatto, si evince una predominante componente sedimentaria, mentre la componente vulcanica effusiva, risulta esclusiva dei settori settentrionali e sud-orientali.

Le litologie rilevate durante il rilevamento geologico-tecnico, sono il risultato degli eventi deposizionali-dislocativi-erosivi che si sono succeduti dal Paleozoico all'attuale.

Di fatto, il rilevamento geologico tecnico ha reso possibile una prima differenziazione, basata sulla natura delle formazioni geologico-stratigrafiche presenti: fondamentalmente si possono distinguere rocce di origine vulcanica (basalti e trachibasalti) e loro depositi detritici e rocce di origine sedimentaria (depositi continentali alluvionali, antichi ed attuali) disposti sui fondi valle.

Nella fattispecie l'area d'intervento si imposta su un substrato geologico costituito da rocce vulcaniche effusive dei plateau basaltici di Campeda –Planargia e specificatamente dei basalti della Sub Unità di Dualchi, costituiti da andesiti basaltiche subalcaline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Px, Opx Ol, trachiti basaltiche e basalti, debolmente alcalini, porfirici per fenocristalli di Pl, Px, CPx.

Le rocce presenti sono riconducibili al vulcanismo alcalino plio-pleistocenico. L'attività vulcanica di cui sopra e la conseguente venuta a giorno dei margini basaltici del Montiferru, sono da correlare all'intensa attività tettonica che ha caratterizzato il Pliocene Medio e superiore, con movimenti di tipo distensivo con la conseguente l'apertura del bacino del Tirreno meridionale e la formazione della Fossa del Campidano.

Gli affioramenti delle vulcaniti suddette, si rilevano in corrispondenza delle Piattaforme basaltiche con basalti, basalti olivinici e trachibasalti in bancate dello spessore di circa 5-6 metri e fatturazione sub-verticale. Tali litotipi, si presentano talora argillificati e terrosi per i processi di dissoluzione chimico-fisica la quale tende a spingersi in profondità coinvolgendo livelli di roccia fino a 3 metri di spessore.



Fig.9: Stralcio dell'inquadramento geologico area d'intervento (Fonte dati: SIT "Sardegna Geoportale")

In merito alle caratteristiche geologiche e geotecniche dell'area è stata eseguita una campagna di indagini dirette e indirette per la valutazione delle caratteristiche stratigrafiche del corpo del rilevato e del piano di sedime della diga. La campagna di indagini è stata programmata in risposta alle richieste di integrazioni pervenute al fine di definire compiutamente l'assetto strutturale della diga. Le indagini si sono sviluppate secondo uno schema ragionato, dando priorità alle indagini indirette che si sono eseguite prima dell'esecuzione dei sondaggi geognostici.

Relativamente alle indagini geofisiche indirette sono state eseguite complessivamente due prospezioni geoelettriche, rappresentate da una tomografia geoelettrica con metodologia dipolare (dipolo-dipolo) e quadripolare (Shlumberger) e una misura dei potenziali spontanei lungo il coronamento della diga, per una lunghezza complessiva di circa 188 metri.

Tali indagini sono state programmate e commissionate direttamente dallo scrivente ed eseguite dalla Ditta Geosardegna del Dott. Geol. Giancarlo Carboni in data 18.01.2018.

Le analisi geoelettriche hanno avuto come finalità quella di valutare la possibile presenza di circolazione idrica sotterranea attraverso la sezione di sbarramento dell'invaso attraverso la misura della conducibilità elettrica e dei potenziali spontanei. Entrambe le prove hanno mostrato una certa concordanza nei risultati evidenziando come il settore centrale della diga sia soggetto a fenomeni di filtrazione d'acqua attraverso il nucleo di argilla.



Fig.10: Ubicazione delle indagini geofisiche

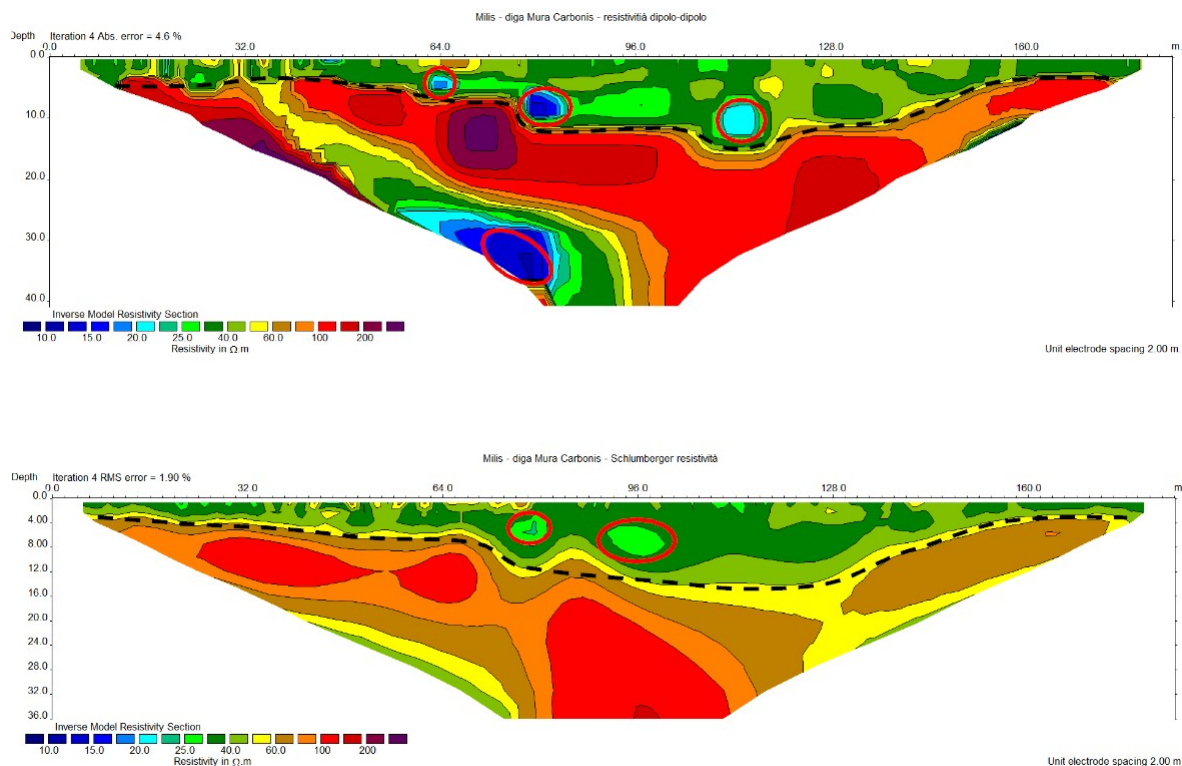


Fig.11: Sezioni di resistività Diga Mura Cabonis

Dalle sezioni tomografiche (Fig.11) è facilmente individuabile il bed-rock di riferimento e il rilevato arginale, che nella zona entrante raggiunge i 14.00 metri di spessore.

Naturalmente, come si evince dalla sezione di resistività, lo spessore del rilevato arginale tende a scemare man mano che ci si avvicina in corrispondenza della sponda dx e sx della diga.

Per quanto concerne il metodo della polarizzazione indotta (PI), è stato ed è ancora largamente utilizzato nell'esplorazione mineraria e nello studio di livelli argillosi in sistemi alluvionali.

Le misure di caricabilità abbinate a quelle di resistività permettono spesso di risolvere le ambiguità in corrispondenza di bassi valori di resistività, i quali caratterizzano sia livelli saturi sia strati argillosi ma si differenziano per diversi tempi di scarica del potenziale elettrico.

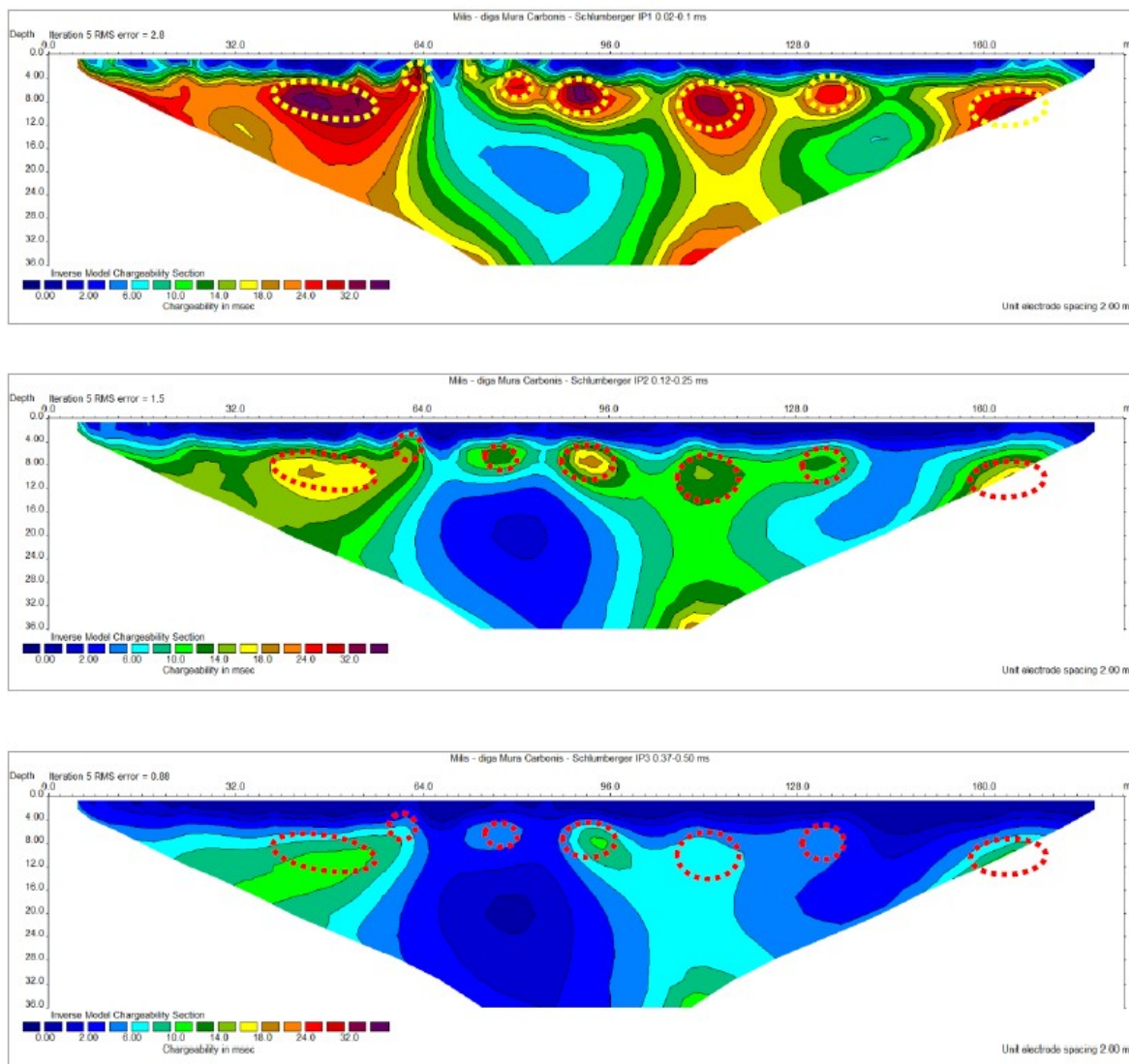


Fig.12: Sezioni di polarizzazione indotta Diga Mura Cabonis

Sulla rappresentazione grafica delle sezioni sono stati graficamente rappresentati i punti di anomalia con un cerchio a tratteggio giallo e rosso a seconda del colore dello sfondo per meglio evidenziarlo, i quali risultano, rispetto all'inizio del profilo e alla profondità dal coronamento della diga, rispettivamente a 44 m-8 m, 64 m-5 m, 80 m-6 m, 90 m-6 m, 114 m-9 m, 134 m-9 m e 164 m-9 m. Sulla base dell'analisi dei tempi di scarica, il quarto punto individuato a circa 90 m dall'inizio del profilo è quello che presenta la maggiore caricabilità, costituendo così il punto di anomalia principale.

Le misure di potenziale spontaneo sono state eseguite con passo da 4 m coincidenti con i punti di infissione dei picchetti dello stendimento di tomografia geoelettrica, ottenendo un andamento che ha fornito indicazioni in concordanza con le prove ad energizzazione attiva già realizzate.

Misura n°	Stazione [m]	Voltaggio [mV]	St-dev [%]	Misura n°	Stazione [m]	Voltaggio [mV]	St-dev [%]	Misura n°	Stazione [m]	Voltaggio [mV]	St-dev [%]
1	0	20.38	1.4	17	64	10.45	0.3	33	128	3.15	0.2
2	4	22.98	0	18	68	11.67	0.1	34	132	11.55	0.2
3	8	19.08	0	19	72	8.98	0.1	35	136	11.1	0.1
4	12	16.11	0	20	76	10.49	0.1	36	140	11.03	0
5	16	13.3	0	21	80	6.16	0.1	37	144	10.49	0.3
6	20	14.32	0.1	22	84	6.51	0.1	38	148	10	0.1
7	24	15.06	0	23	88	3.75	0.3	39	152	10.45	0.6
8	28	15.45	0	24	92	6.46	0.2	40	156	8.55	0.1
9	32	14.63	0	25	96	5.8	0.5	41	160	10.75	0
10	36	14.64	0	26	100	6.51	0.5	42	164	8.51	0.2
11	40	10.69	0	27	104	5.09	0.1	43	168	7.4	0.3
12	44	16.2	0	28	108	5.36	0.2	44	172	10.01	0
13	48	10.6	0	29	112	5.3	0.1	45	176	3.5	0.4
14	52	11.37	0	30	116	4.64	0.2	46	180	9.01	1
15	56	12.98	0.1	31	120	4.81	0.8	47	184	11.47	0
16	60	10.85	0	32	124	9.31	0	48	188	12.38	0.3

Fig.13: Misure di potenziale spontaneo Diga Mura Cabonis

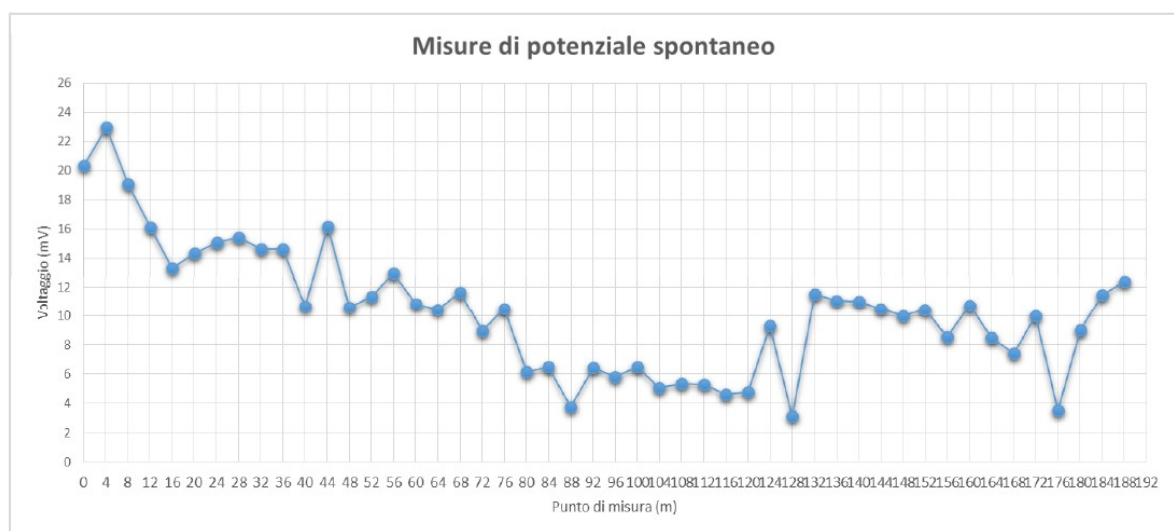


Fig.14: Grafico delle misure di potenziale spontaneo Diga Mura Cabonis

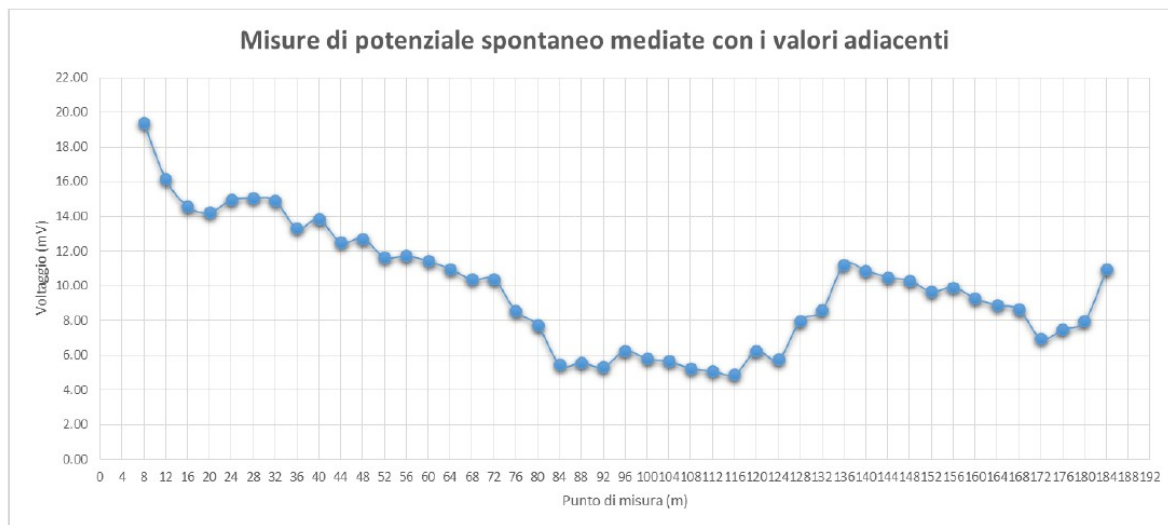


Fig.15: Grafico delle misure di potenziale spontaneo mediate Diga Mura Cabonis

Come si evince dallo schema dei grafici, si rileva un andamento a V, con valori che tendono a diminuire costantemente dall'inizio del profilo, raggiungendo il loro minimo tra 84 m e 116 m dall'inizio del profilo tomografico, per poi crescere di nuovo nonostante si riscontri un picco di minimo a 176 m.

I settori ad anomalia minima indicano possibili movimenti di acqua dall'alto verso il basso, pertanto l'analisi conferma come il settore centrale della diga sia soggetto ad infiltrazioni d'acqua, con possibili infiltrazioni secondarie anche nel settore terminale della diga (Zona dello sfioratore).

Le indagini indirette sono state molto importanti in quanto hanno permesso di individuare le anomalie presenti rispetto alla quota di sfioro delle emergenze al fine di calibrare con maggior dettaglio le indagini dirette.

Le indagini dirette si sono composte in n° 4 sondaggi geognostici a carotaggio continuo eseguiti sul corpo diga a partire dalla quota del coronamento (circa 117.00 m. s.l.m) fino ad una profondità massima di circa 16 metri.

Dei 4 sondaggi eseguiti, n° 3 sondaggi sono stati attrezzati a piezometri (S1, S3, S4), mentre il sondaggio S2 è stato attrezzato con un tubo inclinometrico per misure degli spostamenti del corpo del rilevato, così come richiesto dal Servizio opere idrauliche e idrogeologiche nell'ambito della predisposizione del piano di monitoraggio e controllo.

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti dalla ditta Angius Antonello con direzione lavori a cura del sottoscritto dal 30 gennaio 2019 al 6 febbraio 2019.

I punti di ubicazione dei sondaggi sono stati tracciati a cura del sottoscritto in funzione dell'ubicazione delle emergenze rilevate in corrispondenza del paramento di valle e a seguito dell'analisi della sezione geoelettrica misurata lungo il coronamento.

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 17.80	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S1	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cm²	Vane Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
0.20		Terreno di riporto costituito da sabbie ghiaiose in matrice limo-argillosa	1.00										
0.40													
0.60													
0.80													
1.00		Corpo del rilevato costituito da argille consistenti debolmente limose di colore bruno chiaro											
1.20													
1.40													
1.60													
1.80													
2.00													
2.20													
2.40													
2.60													
2.80													
3.00													
3.20													
3.40													
3.60													
3.80													
4.00													
4.20													
4.40													
4.60													
4.80													
5.00													
5.20													
5.40													
5.60													
5.80													
6.00													
6.20													
6.40													
6.60													
6.80													
7.00													
7.20													
7.40													
7.60													
7.80			8.00										
8.00		Corpo del rilevato costituito da argille plastiche grigiastre consistenti											
8.20													
8.40													
8.60													
8.80													
9.00													
9.20													
9.40													
9.60													
9.80													
10.00													
10.20			10.50										

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 17.80	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S1	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
10.40		Corpo del rilevato costituito da argille plastiche grigiastre poco consistenti, sature											
10.6													
10.80													
11.0													
11.20													
11.4													
11.60													
11.8													
12.00													
12.2													
12.40													
12.6													
12.80													
13.0													
13.20													
13.4													
13.60			13.80										
13.8		Basalto da colore scuro e bassa vescicolarità a colore bruno											
14.00		tendente al grigio con maggiore vescicolarità, debolmente											
14.2		fratturato con tre fratture a riempimento argilloso											
14.40													
14.6													
14.80													
15.0													
15.20													
15.4													
15.60													
15.8													
16.00													
16.2													
16.40													
16.6													
16.80													
17.0													
17.20													
17.4													
17.60			17.80										
17.8													
18.00													
18.2													
18.40													
18.6													
18.80													
19.0													
19.20													
19.4													
19.60													
19.8													
20.00													
20.2													
20.40													

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi



Fig.16: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – 0.00 m ÷ 5.00 m



Fig.17: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – 5.00 m ÷ 10.00 m



Fig.18: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – 10.00 m ÷ 15.00 m



Fig.19: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – 15.00 m ÷ 16.10 m

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 16.00	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S2	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cm²	Vane Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
0.20		Terreno di riporto	0.30										
0.40		Corpo del rilevato costituito da											
0.60		argille consistenti debolmente											
0.80		limose di colore bruno chiaro e											
1.00		livelli argillosi meno consistenti											
1.20		di colore grigiastro											
1.40													
1.60													
1.80													
2.00													
2.20													
2.40													
2.60													
2.80													
3.00													
3.20													
3.40													
3.60													
3.80													
4.00													
4.20													
4.40													
4.60													
4.80													
5.00													
5.20													
5.40													
5.60													
5.80													
6.00													
6.20													
6.40													
6.60													
6.80													
7.00													
7.20													
7.40													
7.60													
7.80													
8.00													
8.20													
8.40													
8.60													
8.80													
9.00													
9.20													
9.40													
9.60													
9.80													
10.00													
10.20			10.50										

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 16.00	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S2	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
10.40		Corpo del rilevato costituito da argille consistenti debolmente limose di colore bruno chiaro e livelli argillosi meno consistenti di colore grigiastro											
10.60													
10.80													
11.00													
11.20													
11.40													
11.60													
11.80													
12.00													
12.20													
12.40													
12.60													
12.80													
13.00													
13.20													
13.40													
13.60													
13.80													
14.00													
14.20			14.30										
14.40		Basalto litoide comprensivo dello strato di alterazione superficiale argillificato											
14.60													
14.80													
15.00													
15.20													
15.40													
15.60													
15.80			16.00										
16.00													
16.20													
16.40													
16.60													
16.80													
17.00													
17.20													
17.40													
17.60													
17.80													
18.00													
18.20													
18.40													
18.60													
18.80													
19.00													
19.20													
19.40													
19.60													
19.80													
20.00													
20.20													
20.40													

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi



Fig.20: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – 0.00 m ÷ 5.00 m



Fig.21: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – 5.00 m ÷ 10.00 m



Fig.22: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – 10.00 m ÷ 15.00 m



Fig.23: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – 15.00 m ÷ 16.00 m

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 13.90	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S3	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cm²	Vane Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
0.20		Terreno di riporto costituito da sabbie ghiaiose in matrice limo-argillosa											
0.40													
0.60													
0.80													
1.00													
1.20			1.40										
1.40		Corpo del rilevato costituito da argille consistenti debolmente limose di colore bruno chiaro											
1.60													
1.80													
2.00													
2.20													
2.40													
2.60													
2.80													
3.00													
3.20													
3.40													
3.60													
3.80													
4.00													
4.20													
4.40													
4.60													
4.80													
5.00													
5.20													
5.40													
5.60													
5.80													
6.00													
6.20													
6.40													
6.60													
6.80													
7.00													
7.20													
7.40													
7.60			7.70										
7.80		Corpo del rilevato costituito da argille plastiche grigiastre consistenti											
8.00													
8.20													
8.40													
8.60													
8.80													
9.00													
9.20													
9.40			9.50										
9.60		Corpo del rilevato - Argille plastiche debolmente consistenti, sature											
9.80													
10.00													
10.20			10.50										

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione:CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione:RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT:PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio:Sondaggio Geognostico

Sonda:Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 13.90	Quota Ass. P.C. 117.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S3	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cm²	Vane Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
10.40		Corpo del rilevato costituito da argille debolmente limose di colore grigio											
10.6													
10.80													
11.0													
11.20													
11.4													
11.60													
11.8													
12.00													
12.2													
12.40													
12.6													
12.80													
13.0													
13.20													
13.4													
13.60			13.70										
13.8		Cappellaccio superiore Basalti	13.90										
14.00													
14.2													
14.40													
14.6													
14.80													
15.0													
15.20													
15.4													
15.60													
15.8													
16.00													
16.2													
16.40													
16.6													
16.80													
17.0													
17.20													
17.4													
17.60													
17.8													
18.00													
18.2													
18.40													
18.6													
18.80													
19.0													
19.20													
19.4													
19.60													
19.8													
20.00													
20.2													
20.40													

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi



Fig.24: Sondaggio geognostico S3 - Diga Mura Cabonis – 0.00 m ÷ 5.00 m



Fig.25: Sondaggio geognostico S3 - Diga Mura Cabonis – 5.00 m ÷ 10.00 m



Fig.26: Sondaggio geognostico S3 - Diga Mura Cabonis – 10.00 m ÷ 13.90 m

OPERE E INTERVENTI PER LA MESSA IN SICUREZZA DELLA DIGA DI MURA CABONIS



Studio di geologia Tecnica Dott. Geol. Simone Manconi
Via Pontano 11 - 09128 Cagliari
C.F. MNCSMN74B13B354G
P.I. 02760610929

STRATIGRAFIA SONDAGGI GEOGNOSTICI

Committente Consorzio di Bonifica Oristanese	Profondità raggiunta 5.00	Quota Ass. P.C. 108.00	Certificato n° 1	Pagina 1
Operatore Ditta Antonello Angius	Indagine Messa in sicurezza Diga Mura Cabonis			Inizio/Fine Esecuzione 30/01/2019-6/02/2019
Responsabile Dott. Geol. Manconi Simone	Sondaggio S4	Tipo Carotaggio Sondaggio Geognostico	Tipo Sonda Sonda IM 8	Coordinate X Y

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio	S.P.T.	Pocket Test kg/cm²	Vane Test kg/cm²	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cars. Catalog.	Falda	Altre prove
0.00			0.00										
0.20		Suolo argilloso di colore grigio scuro	0.50										
0.40		Argilla debolmente limosa	1.00										
0.60													
0.80													
1.00		Argilla sabbiosa di colore bruno scuro con interclusi clasti ciottolosi di rocce basaltiche da millimetrici a centimetrici											
1.20													
1.40													
1.60													
1.80													
2.00													
2.20													
2.40													
2.60													
2.80													
3.00													
3.20													
3.40													
3.60													
3.80													
4.00			4.20										
4.20		Frammenti di roccia basaltica con alterazioni argillitiche	4.50										
4.40		Basalto litoide	5.00										
4.60													
4.80													
5.00													
5.20													
5.40													
5.60													
5.80													
6.00													
6.20													
6.40													
6.60													
6.80													
7.00													
7.20													
7.40													
7.60													
7.80													
8.00													
8.20													
8.40													
8.60													
8.80													
9.00													
9.20													
9.40													
9.60													
9.80													
10.00													
10.20													

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT
Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua
Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici
Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa
Carotaggio: Sondaggio Geognostico

Sonda: Sonda IM 8
Direzione Tecnica Sondaggi



Fig.27: Sondaggio geognostico S4 - Diga Mura Cabonis – 0.00 m ÷ 5.10 m



Fig.28: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – Allestimento Piezometro



Fig.29: Sondaggio geognostico S1 - Diga Mura Cabonis – Allestimento Piezometro



Fig.30: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – Allestimento Inclino metro in ABS



Fig.31: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – Inclino metro con chiusino



Fig.32: Sondaggio geognostico S2 - Diga Mura Cabonis – Passaggio sonda testimone per rilievo discontinuità



Fig.33: Sondaggio geognostico S2 – Passaggio sonda testimone e lettura direzione scanalatura rispetto a N (17°)



Fig.34: Termine delle operazioni di cantiere sul coronamento (in primo piano piezometro S3)



Fig.35: Termine delle operazioni di cantiere sull'unghia del paramento di valle (in primo piano piezometro S4)

Complessivamente, per quanto è stato rilevato durante le indagini dirette, il corpo diga è costituito da un rilevato in argilla debolmente sabbiosa, avente uno spessore complessivo di circa 14 metri nel punto centrale con livelli marcatamente più plastici e saturi alle quote di - 10.50 - 11.50 dalla quota del coronamento.

A termine delle operazioni di sondaggio, in data 11.02.2019 sono state eseguite diverse misurazioni, tra cui le misure dei tre piezometri e dell'inclinometro mediante passaggio della sonda testimone.

Per quanto concerne il piezometro allestito nel sondaggio S1 (fessurato nel tratto relativo ai basalti e cieco nel tratto del corpo del rilevato in argilla) è stata misurata la quota piezometrica a $\cong$ - 6.50 m dalla quota del coronamento, a cui corrisponde pertanto una risalita della falda corrispondente alla linea di saturazione della diga di $\cong$ 9.50 metri dalla base del corpo del rilevato.

Per quanto concerne il piezometro allestito nel sondaggio S3 (fessurato nel tratto relativo al corpo del rilevato in argilla nella quota -13.70 ÷ -7.70 e cieco nel tratto dei basalti) è stata misurata la quota piezometrica a $\cong$ -4.53 m dalla quota del coronamento, a cui corrisponde pertanto una risalita

della falda corrispondente alla linea di saturazione della diga di $\cong 9.17$ metri, pertanto simile a quella del primo piezometro.

Relativamente al piezometro S4 è stata rilevata la quota piezometrica a circa 0.63 m dal p.d.c. corrispondente ad una falda acquifera superficiale.

Per quanto concerne la misura eseguita all'interno del tubo inclinometro con la sonda testimone è stato accertato che il passaggio della strumentazione è avvenuta senza ostacoli fino alla profondità di innesto del tubo inclinometrico, vale a dire fino a 16.10 m dalla quota del coronamento della diga.

In merito alle condizioni generali del corpo del rilevato, appare evidente che lo stesso si trovi in condizioni di equilibrio. Naturalmente la presenza delle emergenze sul paramento di valle è certamente da considerarsi un fattore di tipo destabilizzante per cui necessiterà un intervento di ripristino delle condizioni di impermeabilità iniziali.

A tal fine, l'intervento progettuale proposto è da intendersi doppiamente vincente in quanto oltre a ripristinare le condizioni di impermeabilità pre-esistenti del corpo del rilevato ne consolida anche la staticità.

7. Inquadramento Geomorfologico

Per quanto concerne gli aspetti geomorfologici, in corrispondenza dell'area d'intervento non si rilevano evidenze di strutture tettoniche degne di nota, anche se tuttavia, la presenza di elementi morfologici quali la direzione dei compluvi, del ruscellamento e di alcune scarpate fanno pensare a degli episodi di neotettonica che hanno interessato la zona durante il Plio-Quaternario, influenzando l'allineamento delle direttrici principali dei corsi d'acqua.

Relativamente alle condizioni topografiche, l'area d'intervento è stata analizzata da un punto di vista sismico, così come disciplinato dal D.M. 17.01.2018 e s.m.i.

Per quanto concerne le condizioni topografiche, l'area d'intervento ricade in categoria T1, ovvero "Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione $i \leq 15^\circ$ "

Per quanto attiene la definizione delle categorie di sottosuolo, ai sensi del D.M. 17/01/2008, l'area d'intervento corrisponde ad una categoria di sottosuolo prevalente di tipo "B" ovvero: *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_s 30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s.*

In considerazione del fatto che il Comune di Milis risulta censito dal P.A.I. per fenomenologie di dissesto idrogeologico, è stata eseguita una dettagliata analisi geomorfologica e sovrapposizione cartografica con G.I.S. al fine di stabilire se l'area d'intervento risulta o meno a rischio geologico ai sensi delle norme di attuazione del P.A.I.

Nel complesso, appare evidente come l'area d'intervento non ricada all'interno di nessuna fascia di pericolosità idrogeologica definita dal PAI, dal PSFF e in linea generale dal P.G.R.A.

8. Inquadramento Geopedologico

Dal rilevamento geopedologico di campagna è stato possibile classificare i suoli presenti nel sito oggetto di intervento: nel complesso il livello del suolo risulta essere di spessore maggiore nelle zone più depresse dove l'accumulo sedimentario, susseguitosi nel tempo, ha reso possibile l'instaurarsi di livelli pedologici, nella fattispecie in corrispondenza delle depressioni vallive.

Per contro il livello pedologico risulta essere scarso o addirittura assente in corrispondenza delle culminazioni morfologiche e nella maggior parte dei casi dove si rileva roccia affiorante.

Il paesaggio si presenta nel complesso con una rada copertura arbustiva ed arborea, zone di ombra umide che, localmente, determinano ambienti favorevoli allo sviluppo di suoli mediamente profondi in cui è rilevabile il passaggio fra i diversi terreni a scheletro più o meno organico, evidenti soprattutto per la colorazione maggiormente brunita.

Nella fattispecie si possono distinguere essenzialmente suoli su rocce effusive basiche (basalti) del Pliocene superiore e del Pleistocene e relativi depositi di versante e colluviali.

I suoli che si impostano sulle rocce vulcaniche basiche (basalti del Pliocene e del Pleistocene), sono caratterizzati da aree con forme da ondulate a sub-pianeggianti, a tratti con un'adeguata copertura arbustiva ed arborea: relativamente a tali settori prevalgono profili A-Bw-R, A-R e subordinatamente A-Bt-C e roccia affiorante, da poco profondi, a profondi, franco argillosi, permeabili, neutri e saturi.

Nel complesso si rileva che, nei livelli pedologici relativi ai litotipi vulcanici basaltici, prevalgono una rocciosità e pietrosità elevate, scarsa profondità eccesso di scheletro e idromorfia dovuta allo substrato impermeabile.

9. Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea

L'idrografia superficiale caratterizzante tutta l'area di studio è direttamente connessa con le caratteristiche idrogeologiche del substrato presente in tutta l'area d'intervento.

In quest'ambito, le principali unità idrogeologiche presenti nell'area sono rappresentate dalle sequenze vulcaniche effusive basaltiche che costituiscono gli spartiacque della zona e le sequenze deposizionali pleistoceniche ed oloceniche che costituiscono il materasso fluviale nel quale i corsi d'acqua della zona sviluppano il loro percorso, generalmente di tipo meandriforme e subordinatamente di tipo rettilineo.

In riferimento a quanto disposto dal “Piano Di Tutela Delle Acque” (art. 44 D.Lgs 152/99 e s.m.i., art. 2 L.R. 14/2000, Direttiva 2000/60/CE), nell’ambito del Bacino Unico Regionale (L. 183/89), l’area d’intervento fa riferimento alla Unità Idrografica Omogenea (U.I.O.) Tirso e alla Unità Idrografica Omogenea (U.I.O.) Mare Foghe.

Fatta eccezione per il Fiume Tirso, il resto del territorio, indipendentemente dal bacino di appartenenza, presenta un reticolo idrografico poco sviluppato, di tipo sub-dendritico, formato da aste di limitato sviluppo lineare, a basso grado di gerarchizzazione e con direzioni di scorrimento NW-SE e NE-SW correlate alle principali lineazioni neotettoniche; si tratta sempre di corsi d’acqua a regime stagionale e carattere torrentizio.

Alle Unità Idrografiche Omogenee precedentemente citate, appartengono le seguenti unità idrogeologiche:

- 1) Unità delle Alluvioni Plio-Quaternarie;
- 2) Unità delle vulcaniti Plio-Quaternarie

L’unità idrogeologica delle alluvioni Plio-Quaternarie è caratterizzata da terreni con permeabilità per porosità ed è in generale, questa risulta essere medio-bassa per la presenza di matrice argillosa e per il grado elevato di addensamento del materiale, tuttavia, localmente può essere media o alta in livelli grossolani con ridotta o assente frazione argillosa.

L’Unità idrogeologica delle Vulcaniti Plio-Quaternarie comprende rocce vulcaniche effusive basaltiche, caratterizzate da permeabilità per fessurazione, la quale in generale risulta essere medio-bassa e bassa, tuttavia, localmente, nelle facies maggiormente fratturate e con scarsi riempimenti detritici, può essere media o alta sempre per fessurazione e subordinatamente per porosità. Di frequente, nei livelli profondi, la presenza d’acqua produce idromorfia con formazione di materiali argillosi poco permeabili.

Relativamente alle condizioni di permeabilità del corpo del rilevato e del substrato vulcanico basaltico su cui la diga si poggia, sono state eseguite complessivamente due prove di permeabilità in pozzetto: nel complesso sono state eseguite una prova Lugeon (nel sondaggio S1) all’interno della tasca dei basalti alterati ad una quota di -16.00 m ÷ -14.00 m dal coronamento e una prova Lefranc a carico variabile direttamente sulle argille costituenti il corpo del rilevato arginale, con rabbocco del livello fino alla quota del coronamento.

10. Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lugeon

In merito alla definizione delle condizioni di permeabilità dell’ammasso roccioso che costituisce il piano d sedime dell’area d’intervento, è stata eseguita una prova di permeabilità in foro a carico variabile (Prova Lugeon).

La prova Lugeon è una prova essenziale che consente di valutare l'attitudine di un ammasso roccioso a consentire la circolazione dell'acqua.

La prova è stata eseguita durante il corso della perforazione del sondaggio S1 e la procedura per la misura del coefficiente di permeabilità consiste nelle seguenti fasi:

- Pulizia del foro con lavaggio;
- Immissione del pistoncino (packer) fino al tetto della camera di prova;
- Dilatazione del pistoncino con aria in pressione ad una pressione sufficiente ad evitare perdite di acqua dalla camera;
- Realizzazione della prova mediante immissione di acqua all'interno della camera

La prova consiste nel misurare la portata di acqua iniettata nella camera in esame in almeno tre gradini di pressione in aumento (2.0 bar - 5.0 bar - 8.0 bar) e due gradini di pressione in diminuzione (5.0 bar e 3.0 bar) misurando la costanza della portata (espressa in litri) ogni 2 minuti.

Le prove Lugeon sono state eseguite in avanzamento della perforazione isolando la camera di prova realizzata con un pistoncino (packer singolo) espanso, attraverso una membrana gonfiabile con aria, contro le pareti del foro.

Per ogni prova è stato tracciato il grafico delle portate in funzione delle pressioni in camera di iniezione (bar).



Fig. 36: Packer per esecuzione prova Lugeon

La pressione (p) utilizzata è stata quella corretta secondo la formula:

$$P = P_m + \gamma_w \cdot h - p_c$$

dove:

P_m = pressione letta al manometro;

γ_w = densità dell'acqua;

h = distanza verticale tra il manometro ed il livello statico della falda;

p_c = perdita di carico del circuito.

Ciascun gradino di portata, in salita o in discesa, è stato mantenuto costante per almeno 10 minuti.

In funzione del grafico ottenuto è stato calcolato un parametro di assorbimento dell'acqua espresso in Unità Lugeon (U.L.) definita come portata di 1 litro al minuto iniettata ad una pressione di 1 MPa, per la durata di 10 minuti, in un tratto di foro di 1 m.

Nel caso di mezzo omogeneo ed uniforme (ad esempio roccia con fratture ravvicinate o molto ravvicinate), e se si realizza un moto laminare intorno al foro, il coefficiente di permeabilità può essere ricavato mediante la seguente equazione:

$$k = q/P_e \cdot \gamma_w/c \quad (\text{m s}^{-1})$$

dove:

q = portata assorbita; ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

P_e = pressione effettiva della cavità; (t m^{-2})

c = coefficiente di forma dato dall'espressione (m)

$$c = 2 \cdot \pi \cdot D \cdot ((L/D)^2 - 1)^{1/2} / \ln(L/D + (L/D)^2 - 1)^{1/2}$$

Dove:

D = diametro di prova (m)

L = Lunghezza del foro di prova (m)

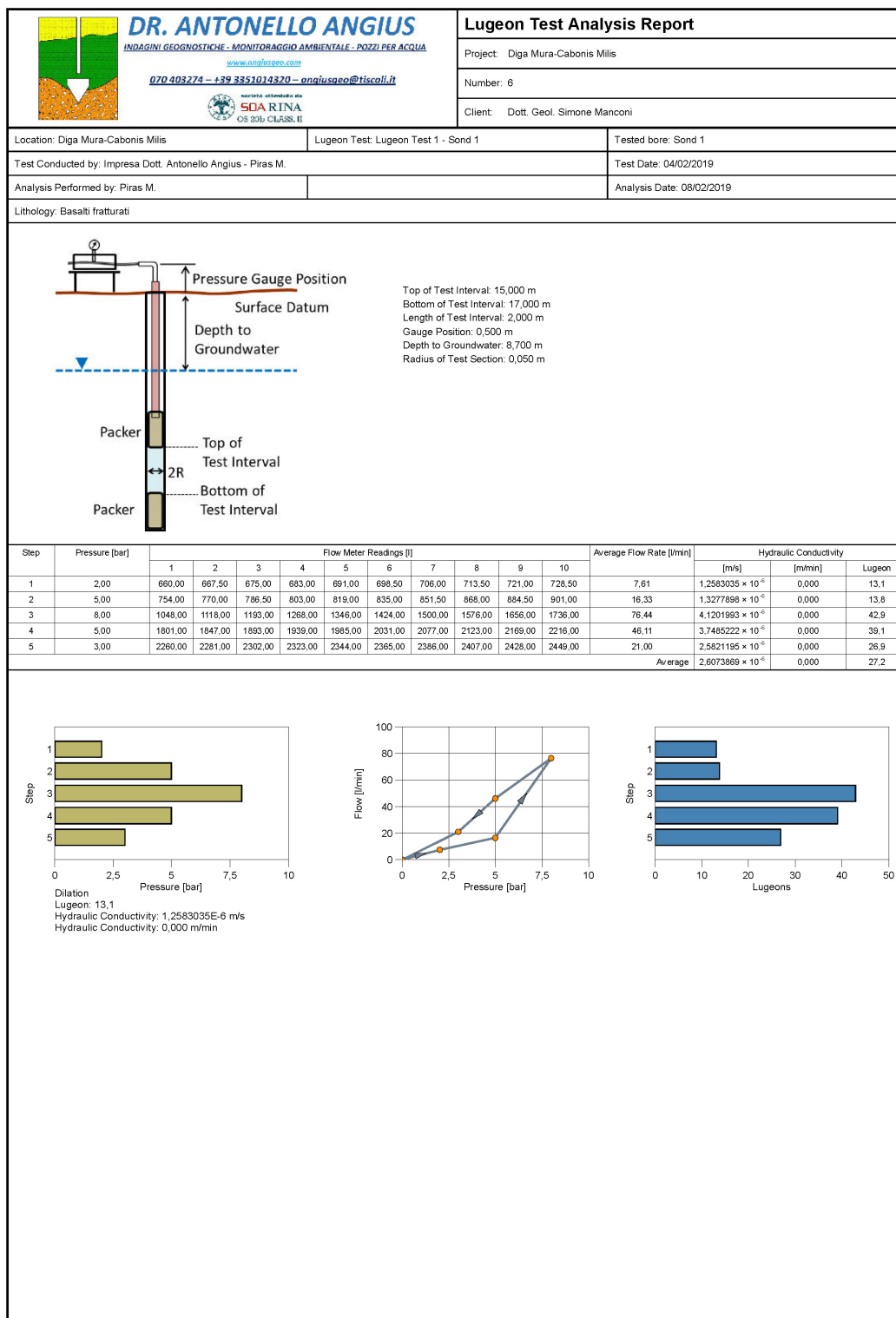


Fig. 37: Diagramma di esecuzione prova Lugeon

Sulla base della prova effettuata è stato possibile pertanto classificare la permeabilità all'interno dell'ammasso roccioso basaltico che pur fratturato, costituisce il piano di appoggio del corpo diga.

Sulla base delle analisi effettuate, nel substrato roccioso basaltico, il coefficiente di permeabilità K risulta essere pari a $\cong 2.61 \cdot 10^{-6}$ m/sec, pertanto equivalente ad un indice scarso di permeabilità, come riportato nella tabella sottostante.

Grado di permeabilità relativa	Coefficienti di permeabilità (m/s)
Alto	$K > 10^{-2}$
Medio	$10^{-2} > K > 10^{-4}$
Scarso	$10^{-4} > K > 10^{-9}$
Impermeabile	$10^{-9} > K$

Pertanto, seppur mediamente fratturato, il substrato roccioso basaltico è caratterizzato da un indice scarso di permeabilità, pertanto da giudicarsi idoneo per il tipo di opera ad esso collegata.

11. Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lefranc

La prova di permeabilità in sito tipo Lefranc è un'indagine diretta destinata a misurare la conducibilità idrica del terreno. A seconda della geometria realizzata in corrispondenza del tratto di foro prescelto e quindi della direzione del flusso che si instaura durante la prova, la permeabilità misurata sarà quella orizzontale (K_h), quella verticale (K_v) oppure una media tra le due (K_h - K_v).

La prova consiste nella misurazione degli abbassamenti d'acqua facendo filtrare quest'ultima attraverso un tratto di foro predeterminato.

Questa prova è destinata ai terreni incoerenti e si svolge durante le fasi di avanzamento della perforazione, dopo aver saturato con acqua il terreno.

Nel caso di terreni a conducibilità idraulica non elevata come il caso delle argille, la prova si esegue a carico variabile. Per l'esecuzione della prova è necessario che le pareti del foro siano rivestite con tubo di rivestimento per tutto il tratto non interessato dalla prova.

Nel caso in esame, considerato che si intendeva misurare la conducibilità del corpo del rilevato, è stata eseguita una prova a carico variabile senza rivestimento, misurando gli abbassamenti in 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 20', 30' dall'inizio dell'abbassamento fino all'esaurimento dello stesso.

PROVA LEFRANC 1 S3

Il coefficiente di permeabilità viene calcolato con la seguente formula:

$$k = \frac{A}{CL (t_2 - t_1)} \ln(h_1/h_2) \quad \text{Carico variabile}$$

A (m²) area di base del foro di sondaggio

h_1 ed h_2 (m) l'altezza dei livelli dell'acqua nel foro rispetto al fondo del foro nei tempi t_1 e t_2 (s)

CL (m) un coefficiente di forma per il quale vengono suggeriti i valori di:

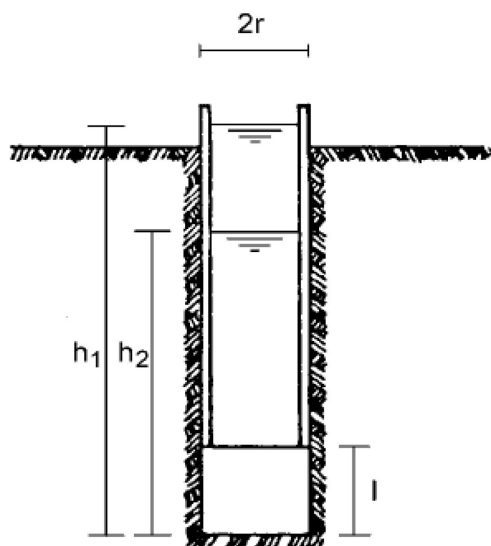
CL=l per $l > 2r$

CL=(4r + l) per $l < 2r$

r (m) raggio del foro

l (m) lunghezza del tratto investigato

Il fattore di forma viene assunto uguale a "l" essendo rispettata la condizione CL=l per $l > 2r$



Tratto di prova: da 9.20-11.00

Falda: 8.7

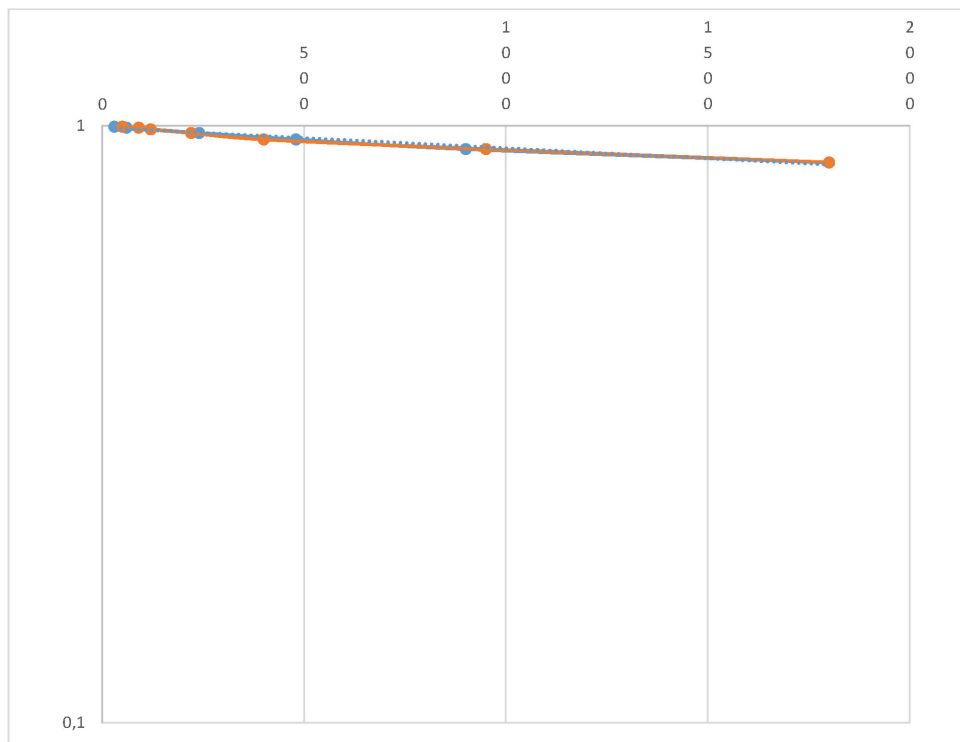
CL: 1.8

A: 0.00785

Tempi (s)	30	60	120	240	480	900	1800
Abbassamenti (m)	0.03	0.06	0.12	0.24	0.45	0.75	1.17

K medio (m/s): 4.9E-7

Viene costruita la curva sperimentale in scala semilogaritmica nella quale si riportano: in ascisse i tempi in scala aritmetica ed in ordinate il rapporto h/h_0 in scala logaritmica. Elaborata la retta di regressione si estrapolano i valori T e h/h_0 da sostituire nella formula precedentemente descritta.



Valori estrapolati

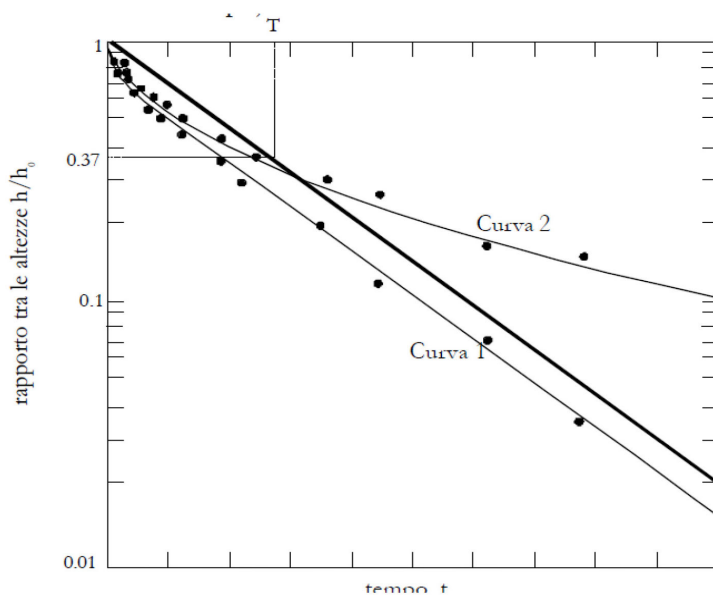
Tempi (s)	50	90	120	220	400	950	1800
h/h_0	0,996552	0,993103	0,986207	0,972414	0,948276	0,913793	0,867816

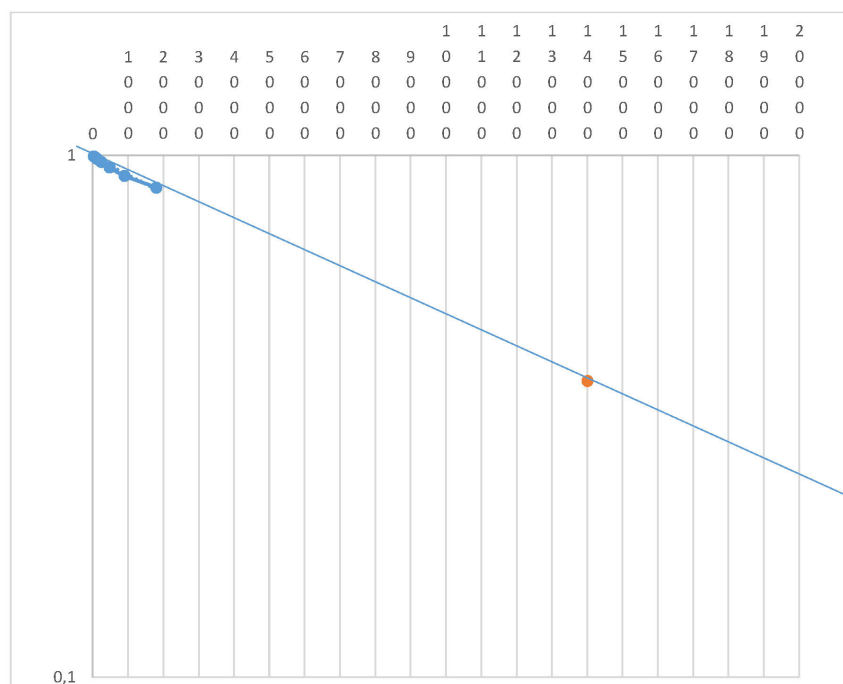
K medio (m/s): 4.48E-7

In alternativa il coefficiente di permeabilità può essere espresso in termini di tempo di riequilibrio T , secondo la formula:

$$K=A/F*T$$

Nella quale T viene calcolato diagrammando i valori del rapporto h/h_0 (espressi in scala logaritmica) in funzione del tempo t (riportato in scala decimale), determinando poi la retta interpolante e tracciando la retta a essa parallela passante per l'origine (corrispondente all'istante iniziale $t=0$ e $h/h_0=1$). Il valore di T è il tempo corrispondente a $h/h_0=0.37$ riportato su questa retta.





$T 0.37 = 14.000$

$K (m/s) = 1.86E-6$

Sulla base della prova effettuata è stato possibile pertanto classificare la permeabilità all'interno del corpo diga, costruito in materiale argilloso-sabbioso

Sulla base delle analisi effettuate, il coefficiente di permeabilità K risulta essere pari a $\cong 1.86 \cdot 10^{-6}$ m/sec, pertanto equivalente ad un indice scarso di permeabilità, come riportato nella tabella sottostante.

In merito alle caratteristiche di conducibilità idraulica, il materiale utilizzato per la formazione del nucleo in argilla, pur risultando scarsamente impermeabile non mostra i connotati tipici dei materiali argillosi francamente impermeabili, laddove il coefficiente di permeabilità K deve essere $< 10^{-9}$ m/s.

Pertanto, relativamente alla presenza delle emergenze sul paramento di valle, le stesse possono essere ricondotte alla tipologia di materiale utilizzato durante la formazione del nucleo in argilla, il quale è da intendersi scarsamente permeabile ma non impermeabile come al contrario ci si sarebbe aspettati.

12. Considerazioni conclusive

Nell'ambito del Programma di sviluppo rurale 2014-2020 – Reg. (UE) n. 1305/2013 – Misura 4 “Investimenti in immobilizzazioni materiali” – Sottomisura 4.3 “Sostegno a investimenti nell'infrastruttura necessaria allo sviluppo, all'ammodernamento e all'adeguamento dell'agricoltura e della silvicoltura” – Tipo di intervento 4.3.2 “Efficientamento delle reti e risparmio idrico” – bando 2017 – procedura di autorizzazione alla prosecuzione dell'esercizio ex Art. 25 dell'Allegato A – L.R. 12/2017, è stato conferito incarico allo scrivente Dott. Geol. Simone Manconi, iscritto al n° 513 dell'Ordine dei Geologi della Sardegna per la redazione della relazione geologica a supporto degli interventi previsti.

La presente relazione è stata redatta al fine di esaminare le questioni di carattere geologico connesse con il progetto definitivo ed esecutivo relativo alle opere e interventi per la messa in sicurezza della Diga di Mura Cabonis in territorio di Milis (OR).

Lo sbarramento in questione è caratterizzato da copiose emergenze sul paramento di valle che ne hanno compromesso la tenuta idraulica. A tal fine, la scelta progettuale consiste nella realizzazione di un sistema che possa garantire oltre che il ripristino delle condizioni di impermeabilità anche un'azione di consolidamento dell'intero corpo del rilevato.

Un'opzione valida e praticata in altri invasi è certamente rappresentata dalla tecnica di consolidamento e sistemazione del paramento di monte mediante la stesa di conglomerato bituminoso previa realizzazione di un diaframma in calcestruzzo, da realizzarsi al piede del paramento di monte.

A tal fine sono state eseguite una serie di indagini indirette e dirette per verificare le reali condizioni della diga, la cui costruzione risale agli anni '50.

Nel complesso la diga è costituita da un nucleo in argilla limosa scarsamente permeabile, avente un'altezza complessiva di circa 14 metri nel punto più alto dello sbarramento e piano di appoggio costituito da un substrato basaltico da poco a mediamente alterato con livelli argillificati superficiali.

Attraverso le indagini indirette (misurazioni geofisiche) è stato accertato che le perdite idriche sono raggruppate nella parte centrale del paramento di valle, così come dimostrato dalle indagini dirette (sondaggi geognostici).

Relativamente alle caratteristiche idrogeologiche del sito sono state eseguite due prove di permeabilità, di cui una destinata al substrato basaltico alterato ed una destinata al corpo del rilevato.

Relativamente al substrato roccioso basaltico, è stato rilevato un coefficiente scarso di permeabilità, pertanto da giudicarsi idoneo per il tipo di opera ad esso collegata.

Relativamente al corpo del rilevato, il materiale utilizzato per la formazione del nucleo in argilla, pur risultando scarsamente impermeabile non mostra i connotati tipici dei materiali argillosi francamente impermeabili

Pertanto, relativamente alla presenza delle emergenze sul paramento di valle, le stesse possono essere ricondotte alla tipologia di materiale utilizzato durante la formazione del nucleo in argilla, il quale è da intendersi scarsamente permeabile ma non impermeabile come al contrario ci si sarebbe aspettati.

Sulla base delle condizioni geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche del sito, si ritiene che la scelta progettuale consistente nel consolidamento e sistemazione del paramento di monte della diga mediante la stesa di conglomerato bituminoso previa realizzazione di un diaframma in calcestruzzo, da realizzarsi al piede del paramento di monte, sia da ritenersi la soluzione progettuale migliore per il caso in specie.