

# 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:

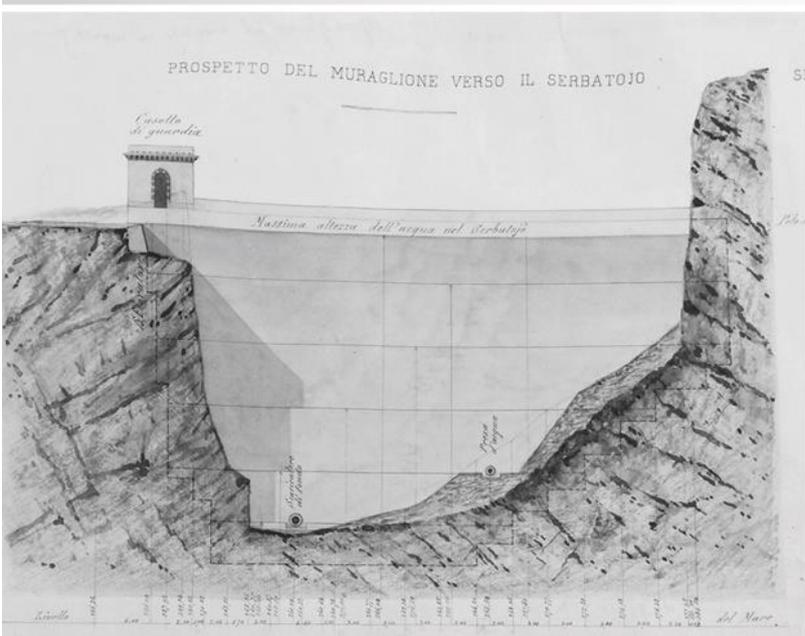
 **TECENTRAL**

 **Metassociati**  
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**

Lombardi SA Ingegneri Consulenti

Archeologo N. FADDA



## GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA

Relazione geologica, geomorfologica e idrogeologica

2020\_0275\_002\_GEO\_R001\_0



COMUNE DI SASSARI

SETTORE LAVORI PUBBLICI E MANUTENZIONE  
DEL PATRIMONIO COMUNALE

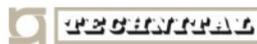
DISMISSIONE DELLA DIGA DI BUNNARI BASSO E PROGETTAZIONE DELLE OPERE  
DI SISTEMAZIONE IDRAULICA CONNESSE  
STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

0	15.10.2021	Versione iniziale	E. Fresia	E. Fresia	C. Silvestri
Versione	Data	Modifica	Redatto	Verificato	Approvato

MANDATARIA:

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

MANDANTI:



 **Metassociati**  
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**  
Lombardi SA Ingegneri Consulenti

ARCHEOLOGO  
N. FADDA



# Indice

1	PREMESSA	1
2	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO	3
3	INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO	10
4	INDAGINI GEOGNOSTICHE PREGRESSE	12
5	INDAGINI GEOGNOSTICHE INTEGRATIVE	19
6	PARAMETRAZIONE GEOTECNICA	22
7	PARAMETRAZIONE GEOMECCANICA	23
8	SISMICITA' DELL'AREA	26
9	ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DI CARATTERE GEOLOGICO	29

## ALLEGATO 1: DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

MANDATARIA:

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

MANDANTI:

 **TECENITAL**

 **Metassociati**  
architettura ingegneria urbanistica

 **Lombardi**  
Lombardi SA Ingegneri Consulenti

ARCHEOLOGO  
N. FADDA



# 1 PREMESSA

Il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica per la dismissione della diga di Bunnari Basso e per la progettazione delle opere di sistemazione idraulica connesse prevede la realizzazione di una galleria di bypass idraulica nella sponda sinistra della diga, e di un argine di tenuta idraulica a valle dell'imbocco della galleria.

Inoltre, il progetto prevede la stabilizzazione dell'area oggetto di dissesto in spalla sinistra a valle del secondo sfioratore.

Il presente documento costituisce la Relazione Geologica redatta a seguito dell'analisi della cosiddetta "soluzione B - Galleria Lunga", schematizzata in Figura 1.

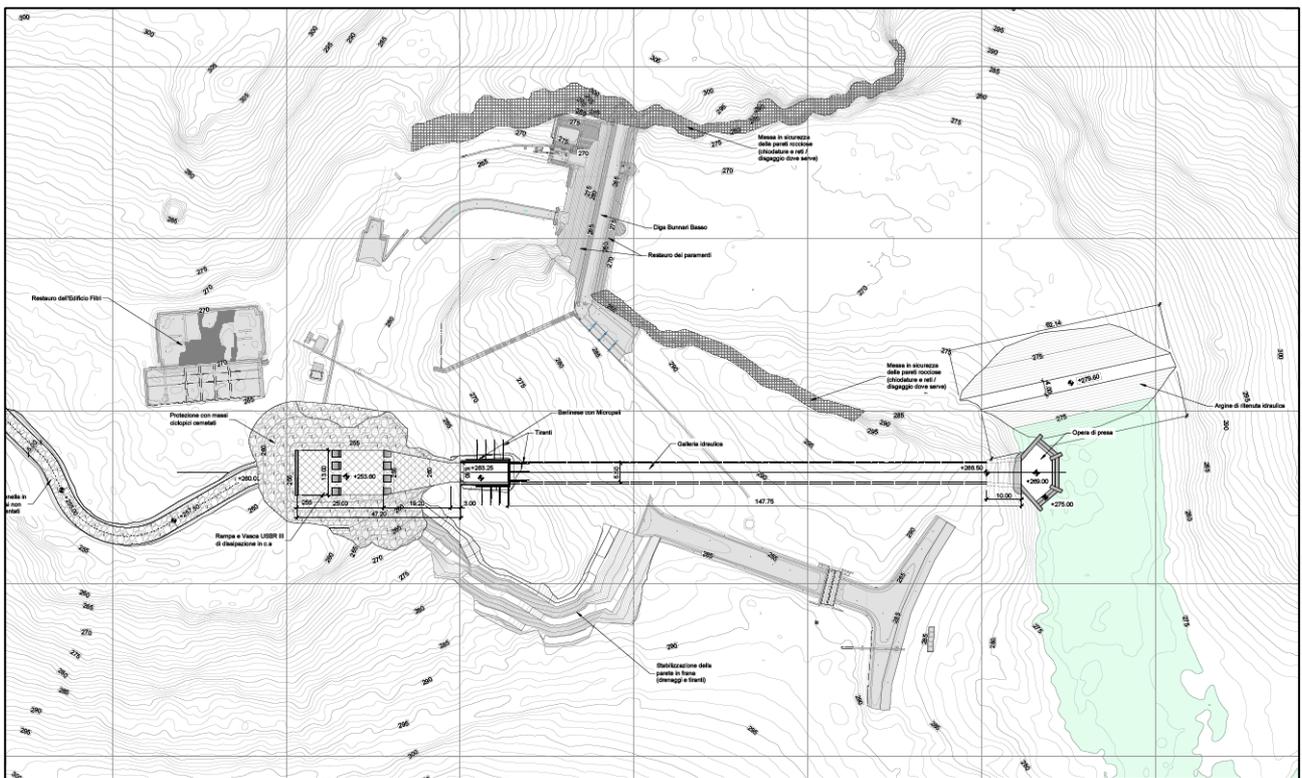


Figura 1 : Illustrazione della soluzione B

Lo studio relativo alle opere progettate si è avvalso di un rilevamento geologico di dettaglio effettuato in campagna, della valutazione di indagini geognostiche pregresse e della conoscenza ed esperienza professionale in ambiti geologici simili.

Il presente studio ha lo scopo di verificare la fattibilità degli interventi previsti rispetto alle caratteristiche stratigrafiche e geologiche-idrogeologiche dell'area in esame.

MANDATARIA:

MANDANTI:



Il presente rapporto costituisce la "relazione geologica" che, ai sensi di quanto previsto dal D.M. 11/3/88 e dal DM 17/01/2018, fa parte integrante del progetto al fine di giungere alle scelte progettuali ed alle verifiche prescritte.

Il presente lavoro è stato condotto in accordo alle norme in vigore ed in particolare:

- Norme Tecniche per le Costruzioni - DM 17 gennaio 2018;
- Circolare 21/01/2019 n 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/01/2018.
- Ordinanza del P.C.M. n° 3274 del 20.03.2003: "Normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" , modificata dalla Ordinanza del P.C.M. n° 3519 del 28.04.2006;
- D.Min. LL.PP. 11/03/88: Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;
- Circ. Min. LL.PP. 24/09/88 n° 30483: L. 02/02/74 n° 64 - art. 1 D.M. 11/03/88 - Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce , la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione;
- A.G.I. - Raccomandazioni sull'esecuzione e programmazione delle indagini geotecniche, 1977.



## 2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

L'area in oggetto è ubicata a SE della fossa tettonica del Sassarese e dell'Anglona, ed è composta principalmente da prodotti vulcanici e sedimentari terziari e quaternari.

La morfologia attuale è il risultato dell'erosione delle coperture sedimentarie mioceniche e dei complessi vulcanici sottostanti da parte del Rio Bunnari, che ha dato vita a vasti altipiani con superfici strutturali leggermente inclinate collocate alla sommità di versanti molto erosi ed incisi dall'azione dell'acqua.

I pendii hanno un'inclinazione più dolce se scavati nei complessi vulcanici piroclastici, leggermente incisi sui calcari e le facies vulcaniche più litificate, fino ad arrivare a pareti verticali nei complessi delle Daciti-Andesiti.

La superficie indagata risulta totalmente costituita da un complesso vulcanico di Andesiti e Daciti massive e litoidi, generalmente interessate da processi erosivi superficiali legati a fenomeni meteorici. Sono inoltre presenti Facies intermedie di transizione tra Andesiti alterate e Andesiti-Daciti litoidi e Andesiti in masse o in colate generalmente interessate da processi di alterazione idrotermale superficiale ("argillificate").



Foto 1: Vista panoramica lato monte affioramenti rocciosi diga Bunnari Bassa.

Lo studio della documentazione geologica abbinata ai sopralluoghi e rilievi effettuati nell'aprile 2021 hanno confermato le informazioni contenute nella documentazione degli studi pregressi.

Si può quindi confermare che la diga di Bunnari Basso ricade principalmente nell'Unità di Osilo, costituita da lave massive di colata che danno origine a corpi cupoliformi e domiformi con tipiche laminazioni di flusso.

L'unità di Osilo petrograficamente è costituita da rocce da porfiriche a debolmente porfiriche in pasta di fondo ipocristallina con microcristalli di plagioclasio, clinopirosseno e abbondante magnetite. La facies Dacite-Andesitica che interessa il corpo diga si presenta massiva e compatta, localmente può presentare delle alterazioni evidenziate nei sondaggi in fondazione diga. Determinazioni radiometriche effettuate nell'ambito del progetto CARG hanno attribuito a questa unità un'età Burdigaliana (Miocene inferiore).

I detriti di versante possono essere suddivisi in detriti eluvio-colluviali a matrice limosa-argillosa e detriti colluvio-alluvionali recenti e attuali.

I detriti eluvio-colluviali superficiali che interessano il versante sinistro sopra il canale fugatore hanno dato luogo ad un dissesto descritto nella documentazione agli atti come frana di medie dimensioni. Con riferimento

MANDATARIA:

MANDANTI:



al sopralluogo condotto nell'aprile 2021 l'area appare interessata da un soliflusso superficiale, di limitata estensione, causato dal processo di erosione del piede del versante innescato dal piccolo affluente di sinistra idrografica alimentato in passato anche dalle acque provenienti dalla struttura del canale fugatore stesso. Questa valutazione andrà confermata nelle successive fasi progettuali mediante una campagna d'indagine incentrata su prospezioni geofisiche e geognostiche con anche strumentazione di monitoraggio.



Foto 2: Vista panoramica area soggetta a soliflusso superficiale in sponda sx a valle del canale fugatore.

Dall'interpretazione dei dati contenuti nei sondaggi effettuati nel 2005/2006 in quest'area possiamo valutare in massimo 5 m lo spessore del detrito di versante interessato dal soliflusso superficiale, al di sotto del quale i sondaggi riportano uno spessore variabile dai 10 ai 14 m di Daciti alterate e fortemente argillificate, cui fa seguito un substrato roccioso composto da Daciti fratturate.

Si nota però che nonostante la densità dei sondaggi effettuati in passato in quest'area non è stato inserito nessun inclinometro in foro, e nemmeno dei target topografici superficiali, per poter così confutare gli eventuali movimenti del versante. Si giunge quindi alla conclusione che nonostante non ci siano evidenze di un movimento franoso in atto, si dovranno eseguire in futuro delle ulteriori indagini in quest'area per una maggiore

MANDATARIA:

MANDANTI:



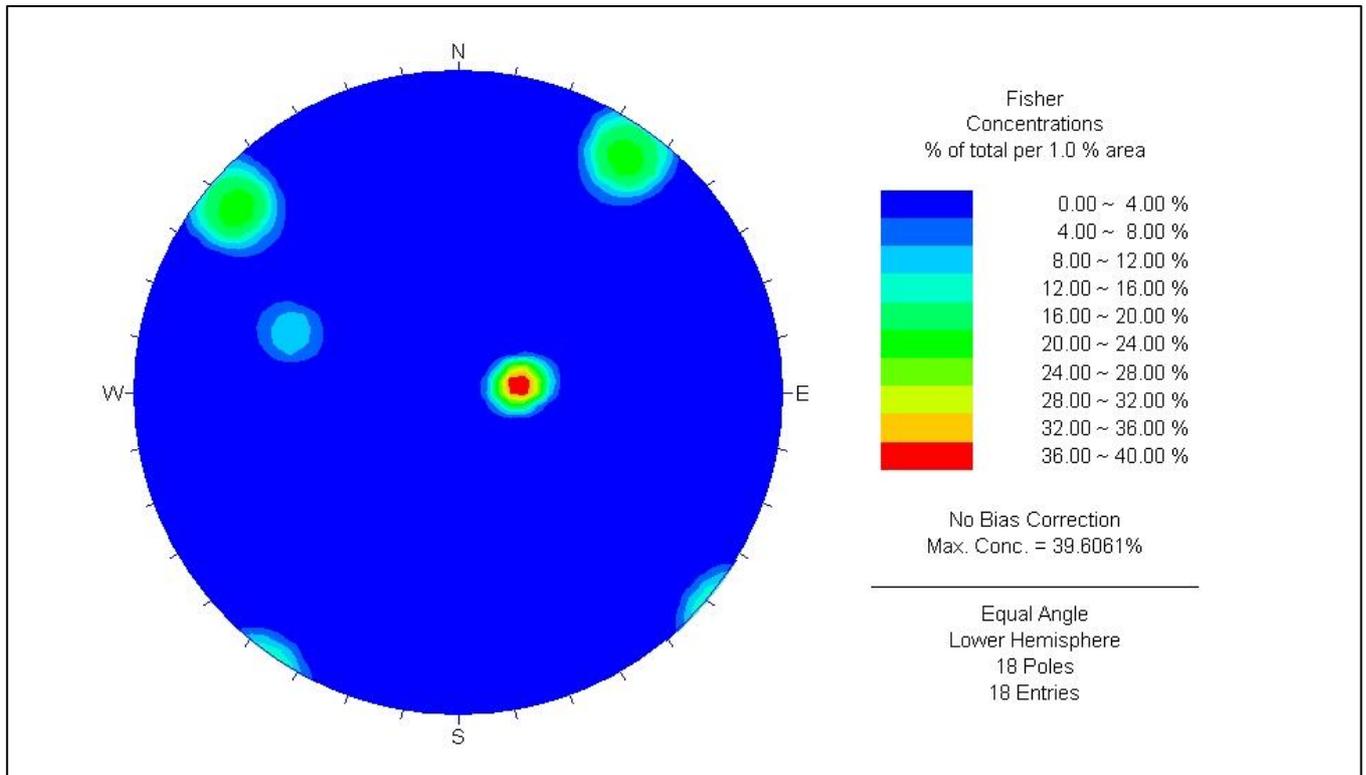
conoscenza del fenomeno descritto nei precedenti studi. Maggiori approfondimenti in tal senso potranno giungere anche da uno studio interferometrico con immagini da satellite (tecnica InSar).

Il rilevamento di campagna ha anche evidenziato la presenza di un forte reticolo di fratturazione nelle pareti verticali costituite da Daciti e Andesiti. In particolare si sono identificati 3 sistemi di fratturazione  $K1=140/90$ ;  $K2=225/90$  e  $K3=260/25$  con persistenze e spaziature metriche che danno origine a grossi blocchi disposti lungo le pareti circostanti la diga di Bunnari basso.

Di seguito vengono riportati gli stereoplot delle discontinuita' principali rilevate rispettivamente a monte e a valle diga.

MONTE DIGA

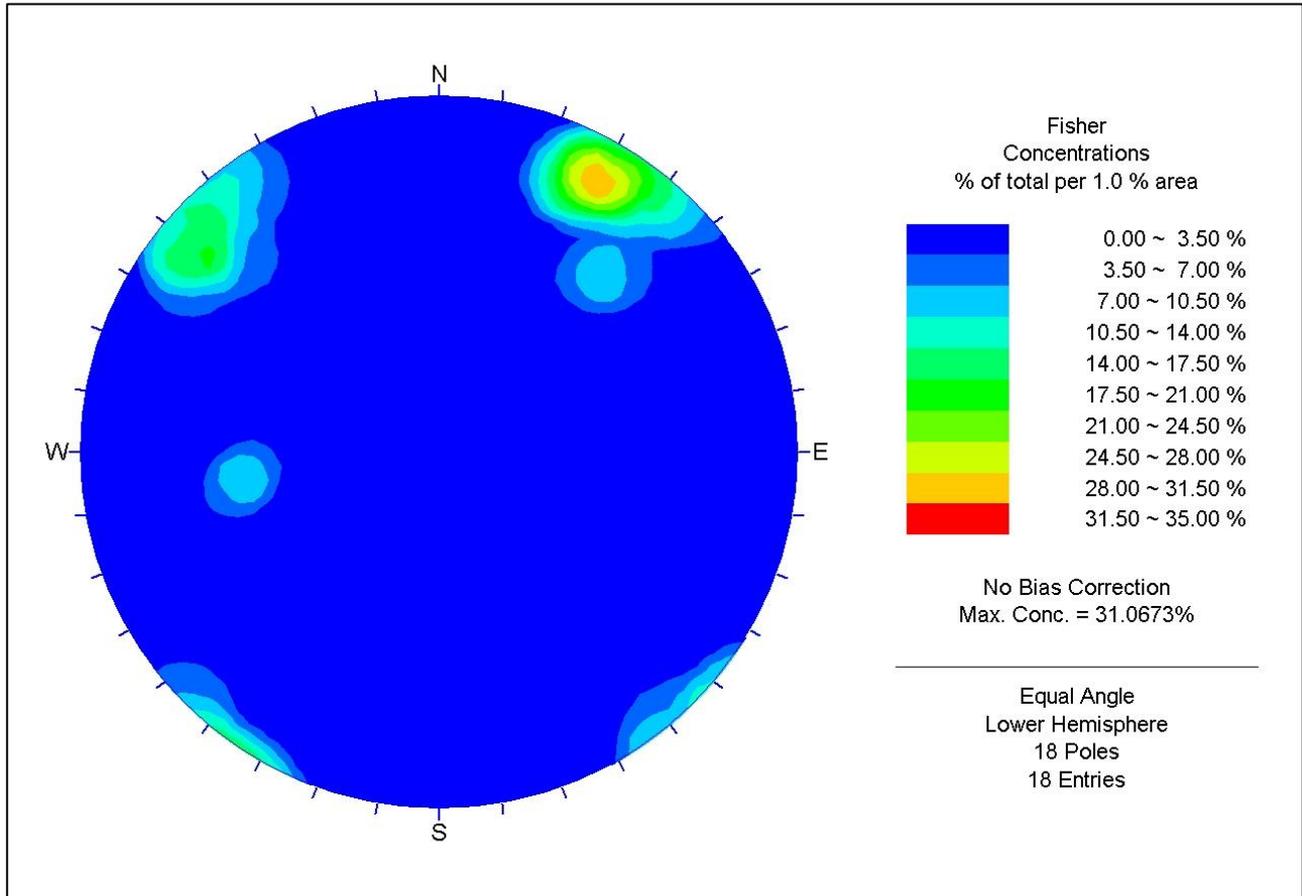
GIACITURA AZIMUTALE	SPAZIATURA	PERSISTENZA	JRC	ALTERAZIONE
N 270-15°	0.2-0.6 m	3-10 m	7-8	MEDIA
N 215-80°	0.6-2.0 m	10 m	7-8	MEDIA
N 130-80°	0.6-2.0 m	10 m	8-10	MEDIA
N 110-50°	0.6-2.0 m	3-10 m	8-10	MEDIA





VALLE DIGA

GIACITURA AZIMUTALE	SPAZIATURA	PERSISTENZA	JRC	ALTERAZIONE
N 210-75°	0.6-2.0 m	10 m	7-8	MEDIA
N 140-80°	0.6-2.0 m	10 m	8-10	MEDIA
N 90-50°	0.6-2.0 m	3-10 m	8-10	MEDIA



La verticalità del versante costituisce un fattore di instabilità potenziale che, unitamente all'intersezione fra i sistemi di fratturazione, può portare a crolli di porzioni di roccia anche di grandi dimensioni che al momento si trovano in equilibrio precario lungo i versanti verticali, in corrispondenza di quasi tutto l'invaso ed in modo particolare in prossimità del corpo diga sia nella zona di monte che di valle.



*Foto 3: Vista panoramica pareti fortemente fratturate sponda imposta diga.*

Come anticipato e con riferimento alla Carta Geologica dell'area in esame, elaborato 2020\_0275\_002\_GEO\_D001 di cui uno stralcio è riportato in Figura 2, il sito in esame è caratterizzato dall'affiorare diffuso del substrato roccioso vulcanico prevalentemente costituito da Andesiti e Daciti. Quest'ultime determinano pareti subverticale ritagliate dai principali sistemi di discontinuità.

Il versante di destra idrografica è diffusamente interessato dall'affiorare del substrato roccioso, localmente coperto da detrito di versante che forma falde detritiche non particolarmente estese o di spessore significativo. In sinistra idrografica il versante presenta una morfologia più blanda, ed il substrato roccioso affiora solamente in prossimità dell'alveo mentre le sponde fluviali sono diffusamente interessate sia da depositi di natura detritico colluviale, sia da depositi di natura eluvio-colluviale in corrispondenza della porzione sommitale della dorsale montuosa.

MANDATARIA:

MANDANTI:

7

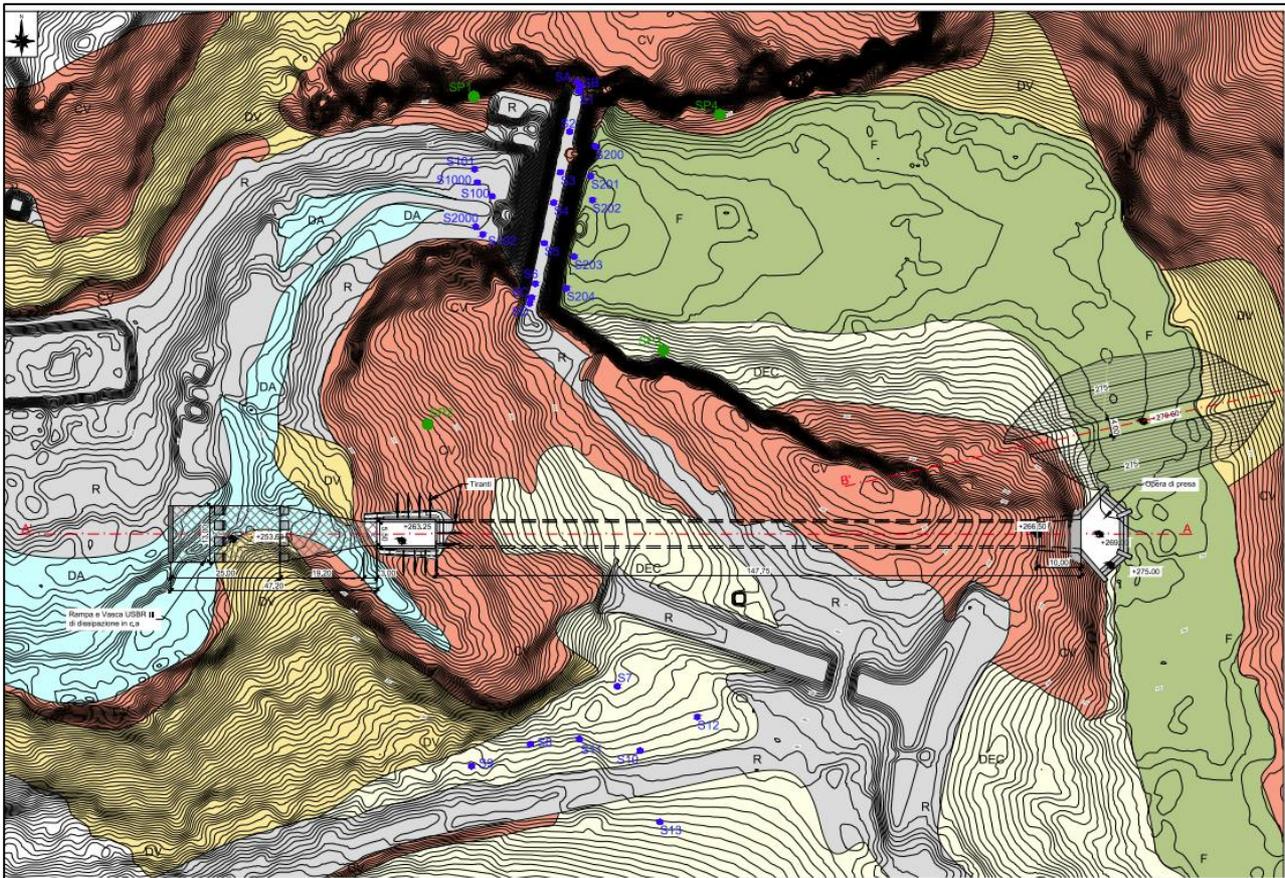


Figura 2 : Carta Geologica della soluzione B

In alveo a valle diga affiorano in maniera diffusa depositi antropici e depositi alluvionali in matrice limo argillosa. In alveo a monte diga affiorano fanghi fini di deposizione.

Dal punto di vista geomorfologico e come riportato nella Carta Geomorfologica di tavola 2020\_0275\_002\_GEO\_D002, di cui uno stralcio è riportato in Figura 3, l'area è caratterizzata sia in sponda destra idrografica sia in sponda sinistra idrografica da parete rocciose subverticali interessate da potenziali fenomeni di crollo attivi imputabili all'estesa fratturazione ed alla verticalità delle pareti. Le sponde fluviali sono altresì interessate da falde detritiche e conoidi detritiche.

Il margine meridionale dell'area di interesse, corrispondente alla porzione sommitale della sponda di sinistra idrografica, e' interessato da un fenomeno di soliflusso. Questa è anche la zona identificata, nell'ambito delle indagini geognostiche pregresse, come possibile frana di dimensioni importanti. Come meglio specificato nei capitoli seguenti la campagna geognostica per le successive fasi progettuali dovrà approfondire la presenza e reale pericolosità di questo possibile fenomeno deformativo.

MANDATARIA:

MANDANTI:

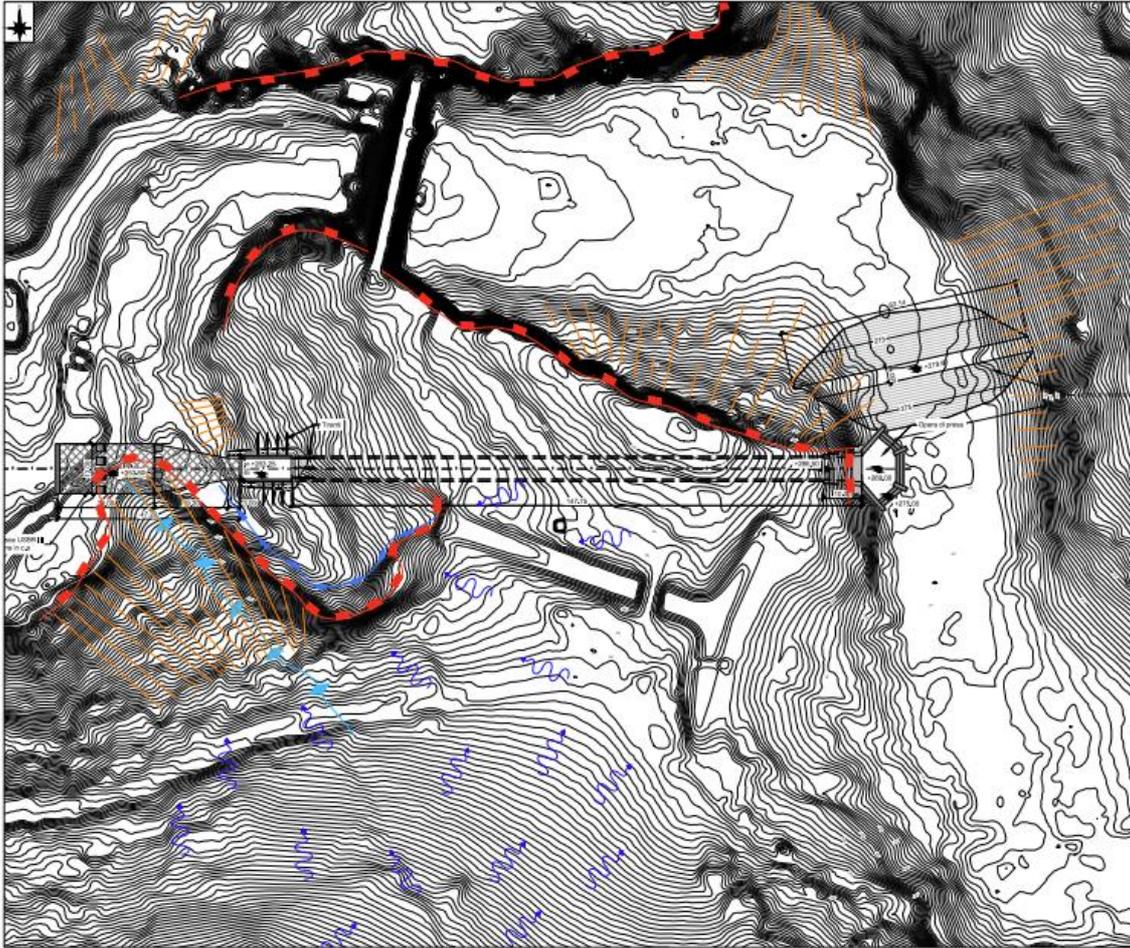


Figura 3 : Carta Geomorfologica della soluzione B



### 3 INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Dal punto di vista idrografico il Rio Bunnari presenta una direzione NNE-SSW nel tratto precedente la realizzazione degli sbarramenti storici; di seguito l'alveo si incunea fra le pareti rocciose assumendo una direzione circa E-W, per confluire molto più a sud ovest nel Rio Mascagni.

Nel corso dei sopralluoghi eseguiti gli apporti idrici nel tratto del Rio Bunnari in esame erano molto limitati.

Dal punto di vista idrogeologico l'area in esame presenta diverse unità idrogeologiche in relazione all'affiorare di depositi sia di natura litoide sia di natura sciolta fine.

Con riferimento alla Carta Idrogeologica 2020\_0275\_002\_GEO\_D003, di cui uno stralcio è riportato in Figura 4, si possono individuare tre grandi unità idrogeologiche: i depositi con grado di permeabilità molto basso, i depositi con grado di permeabilità medio e i depositi con grado di permeabilità alto.

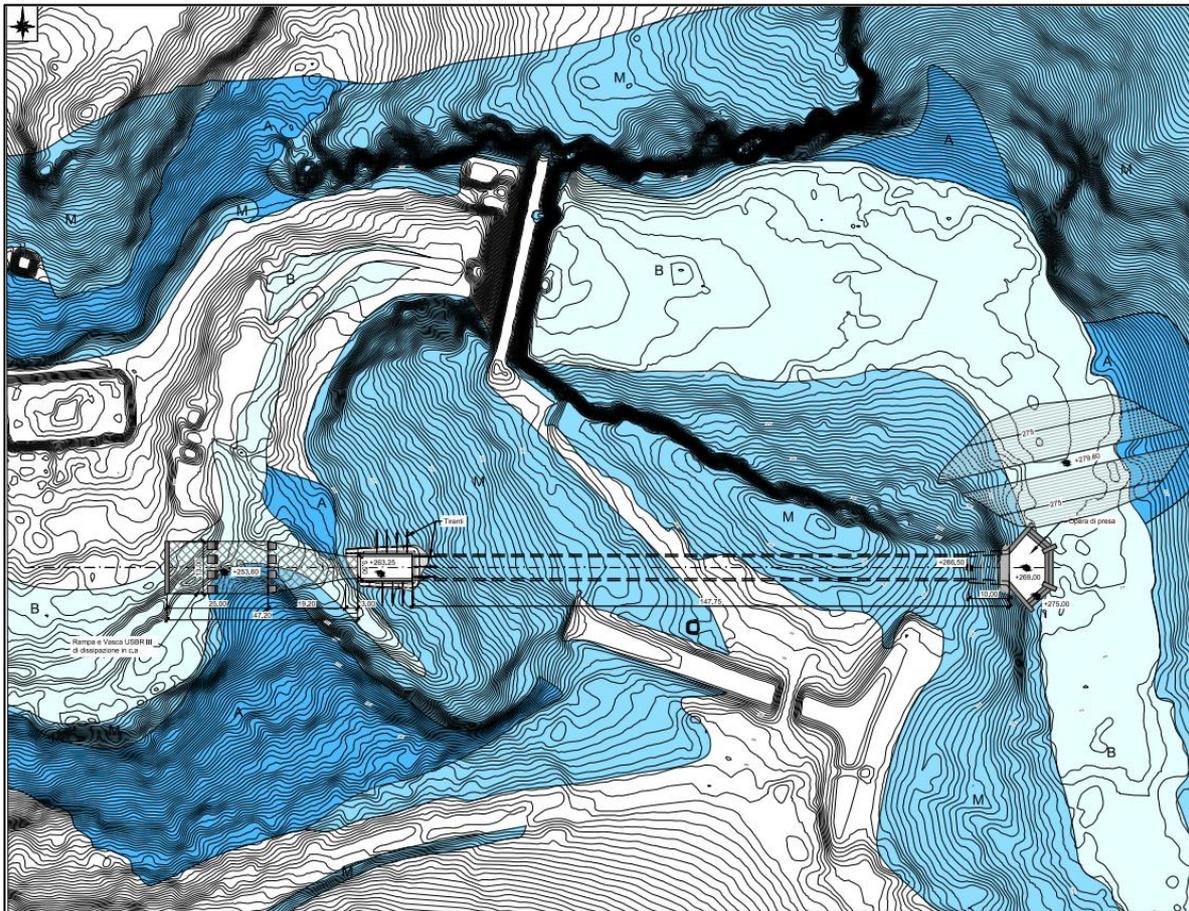


Figura 4 : Carta Idrogeologica della soluzione B



La valutazione del grado di permeabilità dei terreni che interessano la zona in esame e' stata sviluppata sulla base dei rilievi di campagna, delle informazioni tratte da documentazione bibliografica e dai risultati delle indagini geognostiche pregresse. La determinazione delle diverse classi di permeabilità e' stata ottenuta valutando in particolare la granulometria e/o il grado di fratturazione nel caso degli ammassi rocciosi.

Per quanto riguarda la distribuzione delle diverse unita' idrogeologiche, la stessa ricalca sostanzialmente i limiti individuati dal rilevamento geologico.

Depositi con un grado di permeabilità' molto basso: appartengono a questo gruppo tutti i depositi di alveo e fondo alveo, ad eccezione dei depositi antropici. La granulometria di questi materiali e' infatti sempre fine di natura prevalentemente limo – argillosa. La permeabilità è per porosità.

Depositi con grado di permeabilità' medio: appartiene a questo gruppo il substrato roccioso. Il complesso vulcanico e' caratterizzato da un grado di permeabilità' molto basso in corrispondenza dell'ammasso roccioso sano, massivo e chiuso; il grado di permeabilità' puo' divenire elevato in corrispondenza delle zone ad intensa fratturazione o con aperture beanti come nel caso delle porzioni superficiali. La permeabilità è per fratturazione.

Depositi con grado di permeabilità' alto: appartengono a questa unita' i depositi di detrito di falda, si tratta infatti di terreni sciolti costituiti da frammenti rocciosi di pezzatura varia e grossolana, prevalentemente con assenza o scarsita' di matrice fine. La permeabilità è per porosità.

Per quanto riguarda la falda freatica, nel presente studio si fa riferimento ai dati ricavati dai sondaggi eseguiti nell'ambito della campagna geognostica 2004-2006 che riferiscono in corrispondenza delle spalle diga una profondita' della falda di -19 m dal p.c.; in corrispondenza del corpo diga una profondita' della falda variabile da -20 m a -27 m dal p.c.; in corrispondenza della zona di alveo a valle diga una profondita' della falda pari a -1.5 m dal p.c.; in corrispondenza della zona di alveo a monte diga una profondita' della falda pari a -7.3 m dal p.c.; infine in corrispondenza della possibile frana sul versante di sinistra idrografica la falda e' stata rilevata alla profondita' di - 7/-9 m dal p.c..

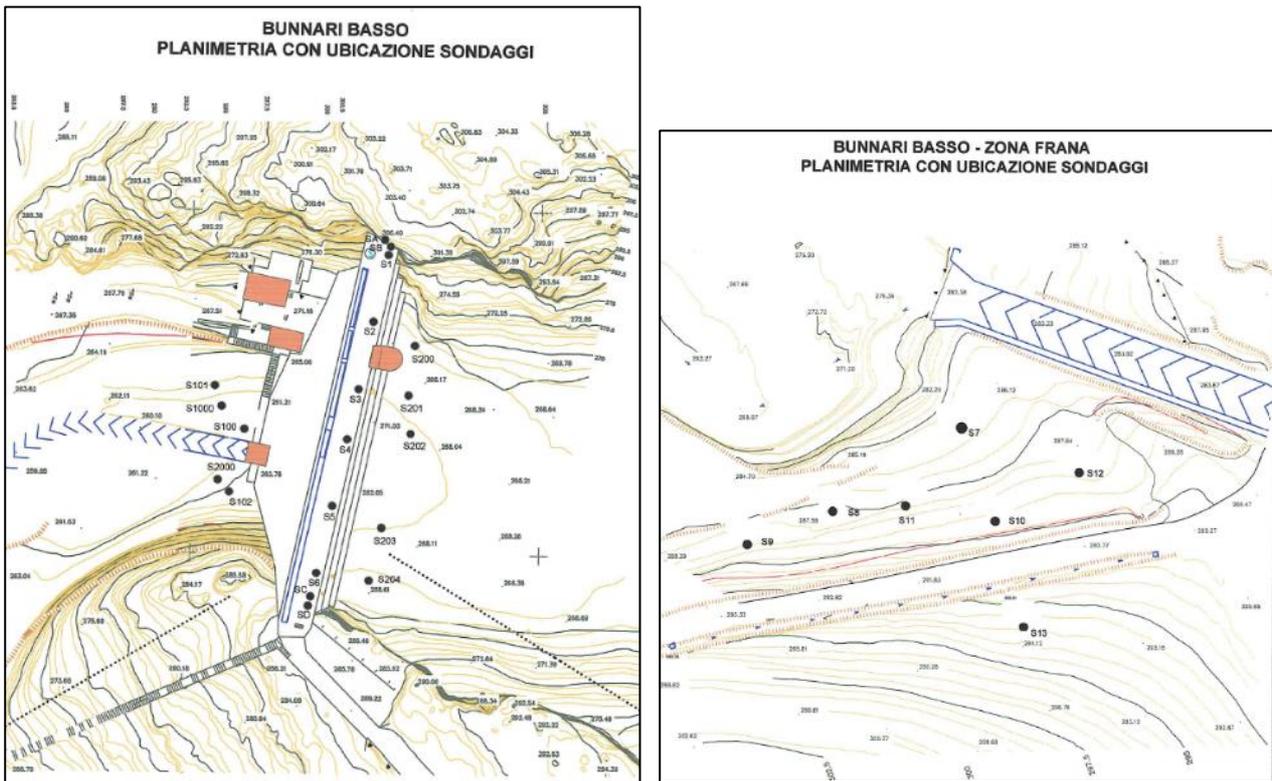


## 4 INDAGINI GEOGNOSTICHE PREGRESSE

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 Nazionale Dighe per gli adeguamenti imposti dalle normative sulle dighe.

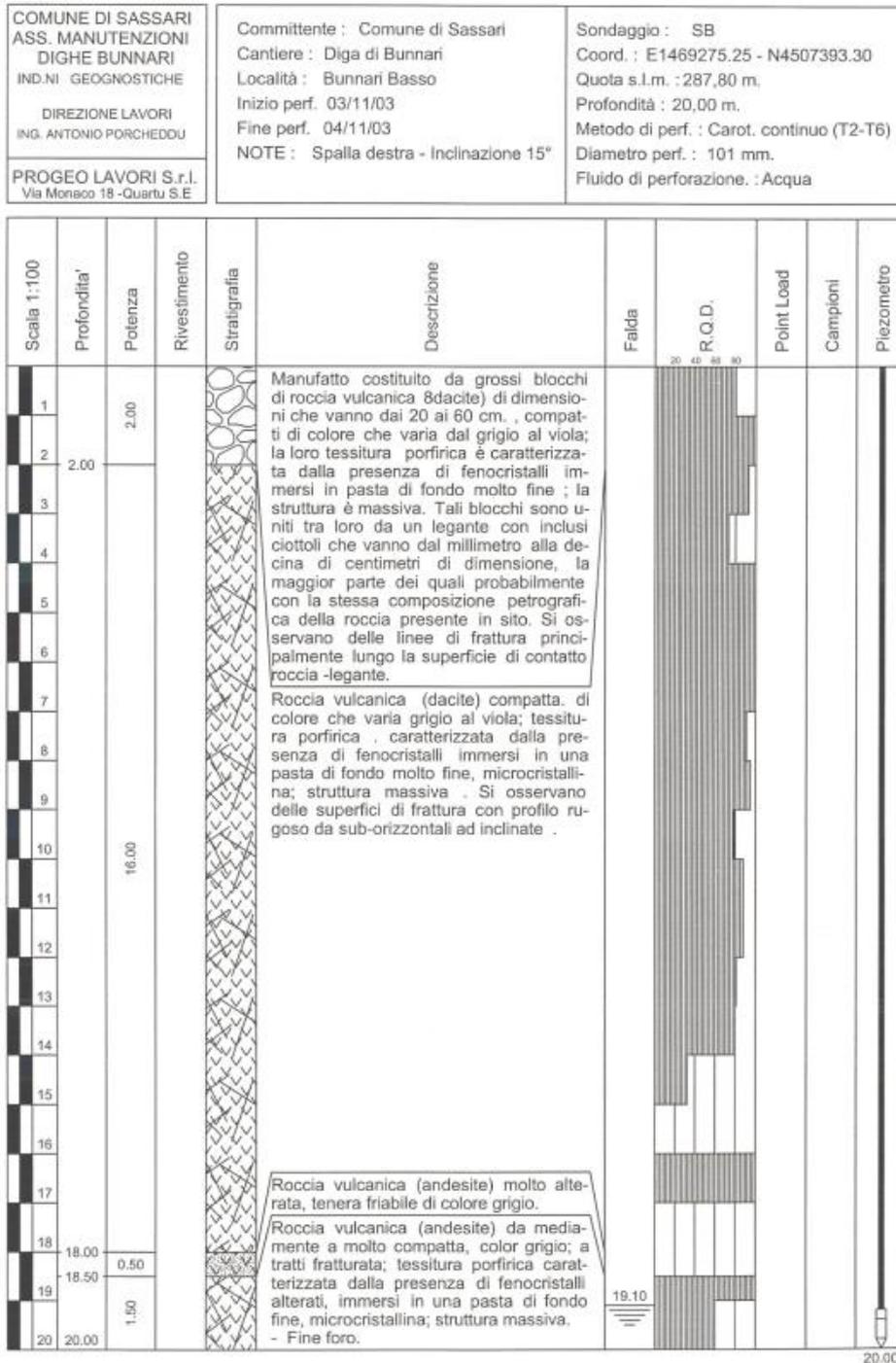
In seguito è stata realizzata per la Diga Bassa una campagna di indagini geognostiche con rilievo geologico di dettaglio sulla sezione d'imposta, ed indagini sul corpo, spalle e fondazioni dell'opera di sbarramento. Inoltre, sono state eseguite indagini geofisiche per la valutazione delle condizioni 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 un fenomeno franoso.

La posizione dei sondaggi realizzati è riportata nella **Figura** .



**Figura 5** : Ubicazione dei sondaggi eseguiti nel 2004 in zona diga (a sx) ed in zona frana in sponda sx (a dx)

Di seguito sono riportati e commentati i logs stratigrafici dei sondaggi significativi afferenti alla campagna geognostica condotta negli anni 2004-2006, i dati sono stati utilizzati per le parametrizzazioni riportate nei capitoli 6 e 7.



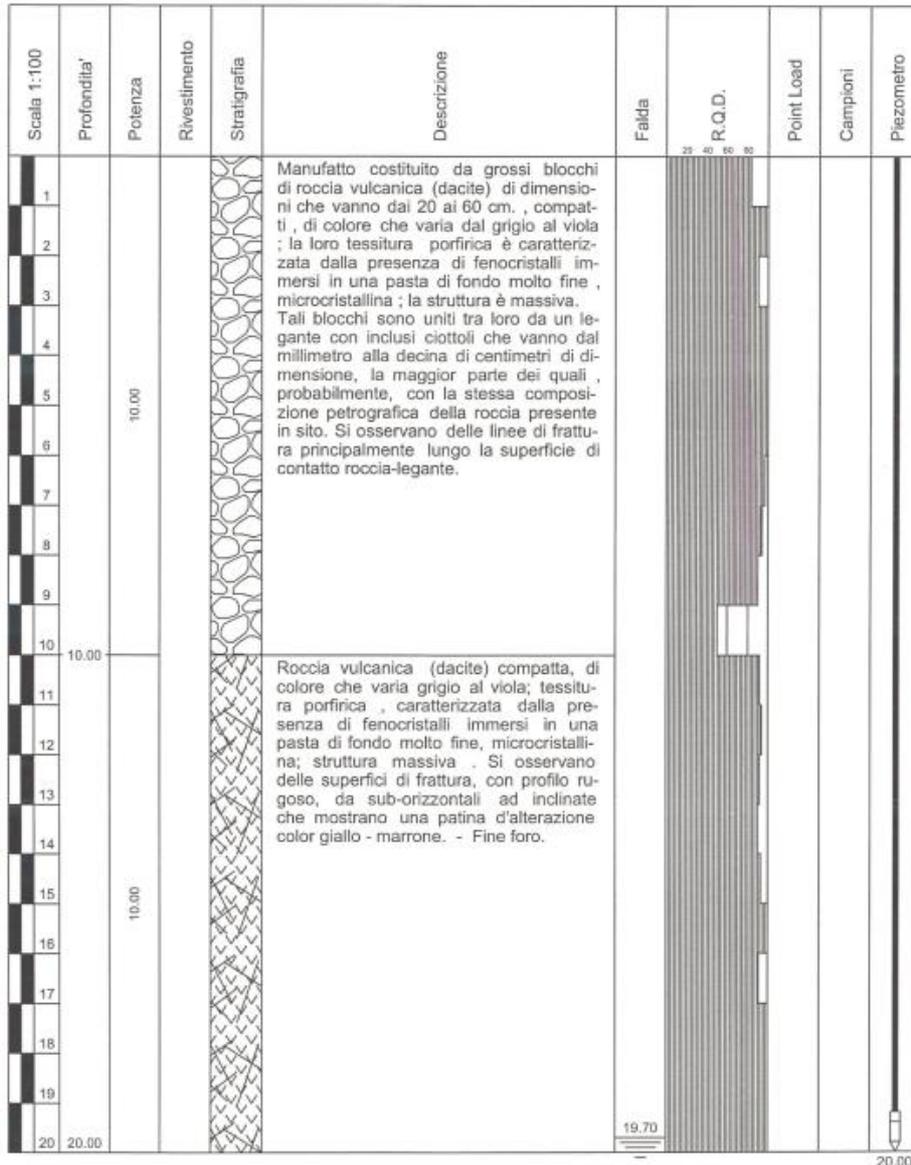
I sondaggi SA e SB condotti in spalla di destra idrografica intercettano un ammasso roccioso dacitico compatto con valori dell'indice RQD alti e compresi fra il 70% e il 100%.

MANDATARIA:

MANDANTI:



<p>COMUNE DI SASSARI ASS. MANUTENZIONI DIGHE BUNNARI IND.NI GEOGNOSTICHE</p> <p>DIREZIONE LAVORI ING. ANTONIO PORCHEDDU</p> <p>PROGEO LAVORI S.r.l. Via Monaco 18 -Quartu S.E</p>	<p>Committente : Comune di Sassari Cantiere : Diga di Bunnari Località : Bunnari Basso - Inizio perf. 19/11/03 Fine perf. 20/11/03 NOTE : Corpo diga/sp. sinistra Inclinazione 15°</p>	<p>Sondaggio : SC Coord. : E1469267.26 - N4507343.85 Quota s.l.m. : 287,69 m. Profondità : 20,00 n. Metodo di perf. : Carot. continuo (T2-T6) Diametro perf. : 101 mm. Fluido di perforazione. : Acqua</p>
---	--	--



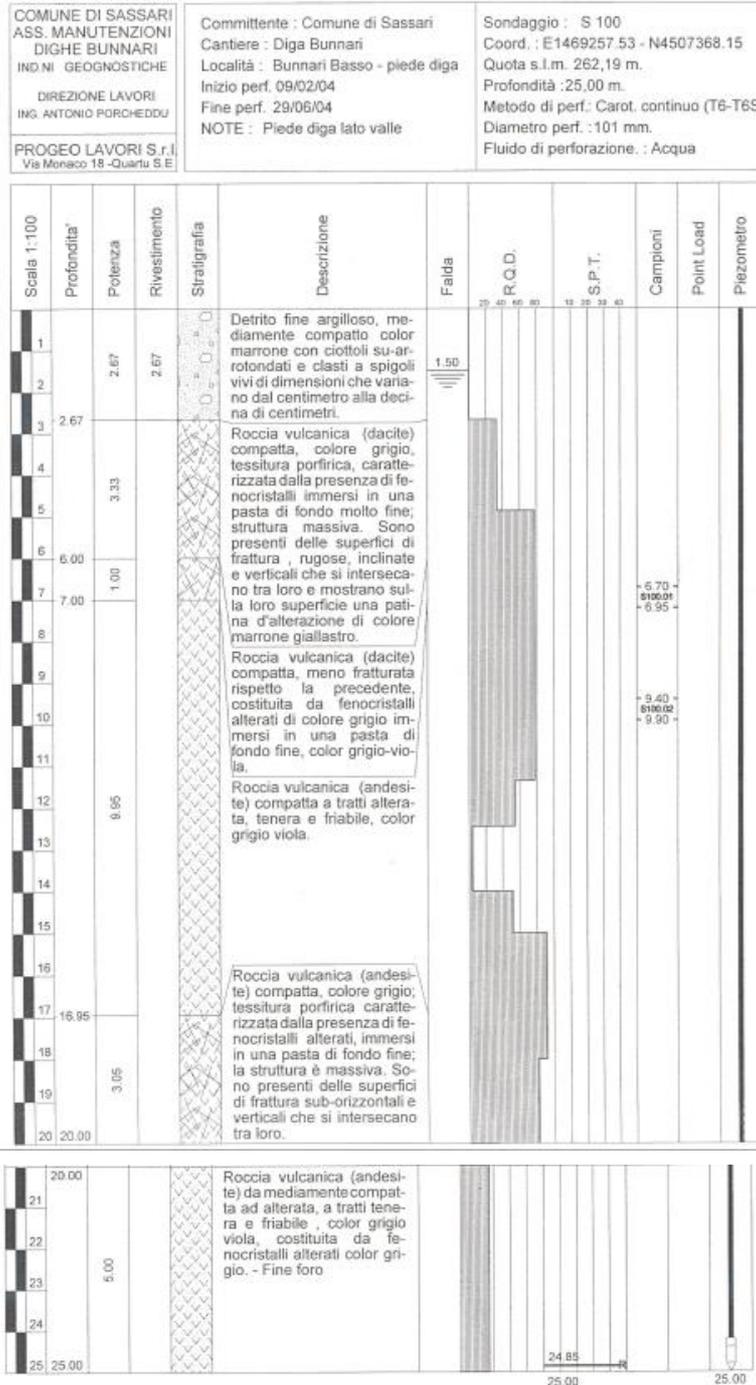
I sondaggi SC e SD condotti in spalla di sinistra idrografica intercettano un ammasso roccioso dacitico compatto con valori dell'indice RQD alti e compresi fra il 70% e il 100%.

La qualità geomeccanica dell'ammasso roccioso presente in corrispondenza di entrambe le spalle diga e' buona, con un grado di fratturazione basso e un grado di alterazione basso.



I sondaggi condotti invece sia a monte sia a valle diga intercettano un ammasso roccioso di peggior qualita' geomeccanica, fratturato, con valori dell'indice RQD nettamente inferiori e mediamente compresi fra il 30% e il 70%, e con un grado id alterazione da alto a molto alto. In alcune stratigrafie la roccia viene descritta come friabile ed estremamente tenera.

Si riportano di seguito i logs stratigrafici dei sondaggi S100 (valle diga) e S 202 (monte diga).

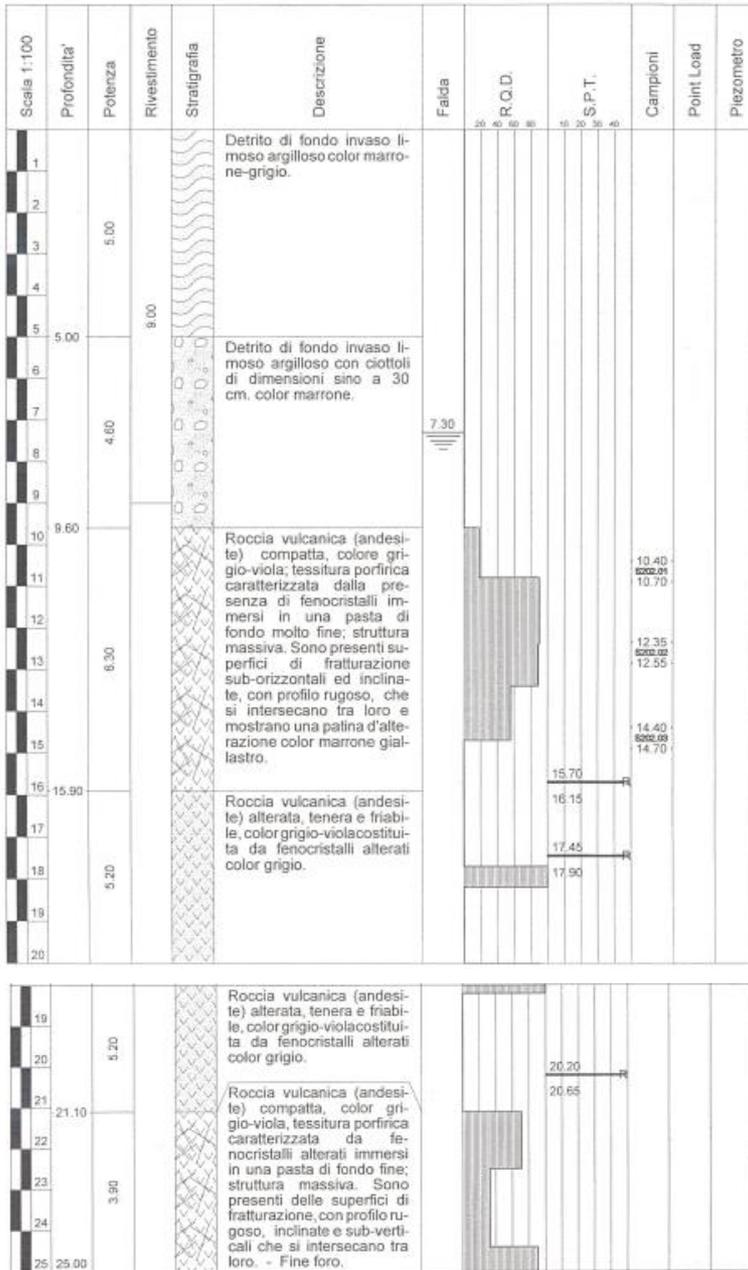


MANDATARIA:

MANDANTI:



COMUNE DI SASSARI ASS. MANUTENZIONI DIGHE BUNNARI IND. N° GEOGNOSTICHE DIREZIONE LAVORI ING. ANTONIO PORCHEDDU	Committente : Comune di Sassari Cantiere : Diga Bunnari Località : Bunnari Basso Inizio perf. 06/07/04 Fine perf. 13/07/04 NOTE : Piede diga lato monte	Sondaggio : S202 Coord. : E1468281.37 - N4507367.70 Quota s.l.m. 267,12 m. Profondità :25,00 m. Metodo di perf. Carot. continuo Diametro perf. :101 mm. Fluido di perforazione Acqua
PROGEO LAVORI S.r.l. Via Monaco 18 -Quartu S.E		



In corrispondenza della zona della possibile frana in sponda di sinistra idrografica sono stati condotti diversi sondaggi; di seguito si riporta il log stratigrafico del sondaggio S8.

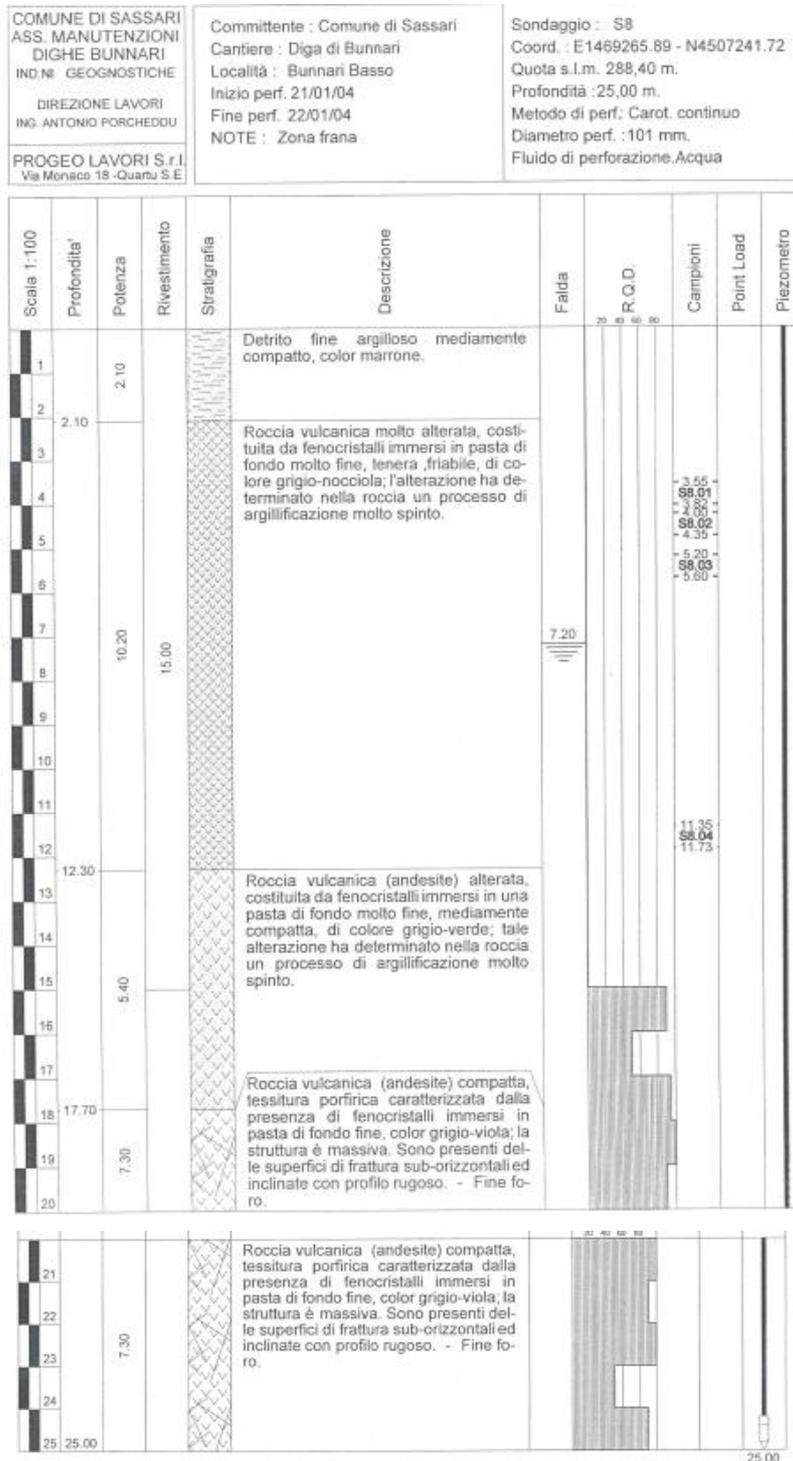
In generale si evince una successione stratigrafica costituita per i primi 2 metri da detriti fini di natura colluviale, ai quali segue per uno spessore di circa 10 m uno strato di dacite completamente argillificata e fortemente

MANDATARIA:

MANDANTI:



fratturata e alterata. Di seguito l'ammasso roccioso aumenta le proprie caratteristiche geomeccaniche con la profondità, assumendo parametri di roccia compatta e poco alterata al di sotto dei 15 m di profondità.



MANDATARIA:

MANDANTI:



I dati relativi ai sondaggi condotti nella zona di frana non sono stati utilizzati al fine della parametrizzazione geomeccanica (vedi Capitolo 7), si tratta infatti di valori estremamente bassi, esterni all'area di imposta del nuovo progetto e che andranno comunque verificati durante le successive indagini geognostiche.



## 5 INDAGINI GEOGNOSTICHE INTEGRATIVE

Per lo sviluppo delle successive fasi progettuali si rende necessaria la realizzazione di una campagna geognostica integrativa basata su:

- Traverse sismiche a rifrazione e profili Masw;
- Sondaggi a carotaggio continuo con prove in sito e prelievo di campioni da sottoporre a prove di laboratorio;
- Pozzetti esplorativi mediante escavatore

Per quanto riguarda la geofisica è quindi prevista la realizzazione di due tipologie di indagini, entrambe di carattere sismico: Profili Sismici a Rifrazione e Profili Sismici MASW.

In particolare è prevista, in corrispondenza degli assi di sviluppo dell'argine e della galleria idraulica, la realizzazione di due profili di rifrazione sismica che permetteranno di valutare e verificare la successione stratigrafica.

Il profilo lungo la galleria sarà molto esteso e comprenderà a monte l'opera di presa, alveo compreso, e si estenderà a valle lungo tutta la vasca di dissipazione fino alla sponda destra. Questo profilo consentirà di rilevare una stratigrafia completa da monte a valle in asse galleria, di individuare il contatto dell'ammasso roccioso in valle e sulle sponde, e di segnalare l'eventuale presenza di zone ad elevata fratturazione nell'ammasso roccioso incassante la galleria.

Per l'argine, invece, il profilo permetterà di definire in modo continuo il contatto tra materiale alluvionale ed ammasso roccioso.

In corrispondenza della zona di frana sono previsti N° 3 profili a rifrazione, al fine di determinare in maniera estesa il contatto detrito/substrato, zone particolarmente allentate che potrebbero essere correlabili con volumi mobilitati o mobilizzabili, la relativa distribuzione all'interno del versante in esame e l'eventuale correlazione con lo spessore della roccia interessata dal processo di argillificazione.

Relativamente ai profili MASW sono previsti N° 4 stendimenti ubicati in corrispondenza dell'argine di tenuta, dell'opera di presa della galleria, della vasca di dissipazione e nei pressi dell'edificio filtri.

Saranno atti alla determinazione del profilo verticale delle onde Vs e quindi anche per la definizione della categoria sismica del sottosuolo sulla base delle NTC 2018.

Un totale di N. 16 sondaggi, tutti a carotaggio continuo, sono previsti in corrispondenza delle diverse opere in progetto. La loro inclinazione, direzione e profondità sono tarate in modo da intersecare le formazioni di interesse per le opere.

Sono previsti diversi tipi di prove in foro, che si contraddistinguono se l'ammasso attraversato è di tipo sciolto o lapideo. In materiali sciolti, si privilegia la realizzazione di prove penetrometriche dinamiche di tipo SPT per la definizione della caratteristiche di resistenza e deformabilità, di prove pressiometriche per la deformabilità,



e di prove Lefranc per la permeabilità. Nelle rocce, si realizzeranno log ottici o acustici (l'uno o l'altro in funzione della presenza di acqua in foro) per la messa in evidenza delle caratteristiche geo-strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità), prove dilatometriche per le caratteristiche di deformabilità e prove Lugeon per le permeabilità e una valutazione del grado di fratturazione.

Alcuni sondaggi saranno attrezzati con piezometri ed inclinometri, la cui lettura dovrà essere programmata con cadenza regolare ed estesa per almeno 1 anno solare dal momento della loro installazione.

Le prove di laboratorio previste per raggiungere gli obiettivi della progettazione sono elencate di seguito:

#### CAMPIONI DI TERRENO SCIOLTO:

- Prove di classificazione generale con misura della densità apparente, porosità, contenuto d'acqua, granulometria sia con setacci che con sedimentazione (per via umida in sospensione), Limiti di Atterberg. Queste prove verranno diffusamente eseguite per permettere di classificare geotecnicamente i terreni;
- Prove meccaniche di tipo taglio diretto (in condizioni drenate) e triassiale non consolidata non drenata (TX UU) su campioni indisturbati. Queste prove saranno realizzate prioritariamente sui terreni prelevati in corrispondenza dell'argine e nella zona di frana e saranno finalizzate alla caratterizzazione geotecnica dei terreni.
- Prove di compattazione di tipo Proctor. Prove di questo tipo verranno eseguite sui campioni prelevati dai pozzetti ubicati nell'invaso della diga, nel caso in cui il materiale prelevato mostri caratteristiche geotecniche in termini di granulometria e di plasticità (Limiti di Atterberg) che lo rendano possibilmente adatto/reimpiegabile come materiale da costruzione per il nucleo impermeabile della diga. In questo caso verrà anche determinata la percentuale di materiale organico contenuto.

#### CAMPIONI LITOIDI IN ROCCIA:

- Misura della densità;
- Prove meccaniche di tipo compressione monoassiale e Point Load Test, per la determinazione delle resistenze a compressione. Queste prove verranno realizzate diffusamente su tutti i campioni litoidi;
- Prove meccaniche di tipo Triassiale e Trazione indiretta (brasiliiana). Queste prove verranno realizzate in aggiunta alle prove di compressione per la determinazione completa dell'involuppo di resistenza della roccia intatta (criterio di Hoek-Brown). Saranno realizzate principalmente sui campioni prelevati in corrispondenza della galleria idraulica che necessita una caratterizzazione completa dell'ammasso roccioso. Sui campioni della galleria si realizzeranno anche prove di taglio diretto sui giunti naturali per la caratterizzazione delle resistenze lungo i piani di discontinuità dell'ammasso roccioso.

La parete ubicata direttamente a valle del secondo sfioratore e la sua estensione verso la sinistra subiscono fenomeni erosivi evidenti che, secondo la documentazione disponibile, potrebbero essere riconducibili ad una frana più estesa che interessa il versante posto a monte.



Per questo motivo N.7 sondaggi, ubicati sul versante a monte tra il sentiero che conduce al ponte dello sfioratore e l'incisione a valle dello sfioratore, sono stati realizzati durante la campagna del 2006.

Le indagini non hanno permesso di chiarire se il processo di argillificazione che interessa il substrato roccioso è responsabile/corresponsabile di un fenomeno deformativo sviluppato lungo un piano di scivolamento che interessa il versante a monte, oppure se esso rende semplicemente più sensibile all'erosione la parete a valle dello sfioratore, il cui fronte è sottoposto a fenomeno di erosione regressiva.

I sondaggi avranno quindi lo scopo di chiarire i cinematismi in atto, di verificare i volumi interessati da questo cinematismo, di osservare e caratterizzare i terreni coinvolti, tarare l'indagine geofisica e permettere un corretto dimensionamento delle opere di stabilizzazione della parete ed eventualmente del versante.

Sono quindi previsti N. 2 sondaggi orizzontali, denominati S10 e S11, rispettivamente di 25 e 30m, posizionati lungo il piede di valle della parete, all'interno dell'incisione morfologica. I sondaggi orizzontali andranno ad indagare lo spessore di questo strato argillificato che in ogni caso andrà stabilizzato.

Sul versante posto a monte invece, sono previsti N. 4 sondaggi verticali (da S12 a S15) di lunghezza 25m, il cui scopo principale, oltre alla verifica e caratterizzazione dello spessore argillificato, sarà di ricercare la presenza di un piano di scivolamento e/o di indizi geo-strutturali che possono ricondurre ad un movimento più profondo.

I sondaggi S13 e S14 saranno quindi attrezzati con inclinometri a tutta altezza (L=25m). La scelta dei sondaggi attrezzati con inclinometro potrà variare (con inversione tra piezometri ed inclinometri) in funzione delle osservazioni ottenute nel corso della campagna d'indagine sui log stratigrafici e ottici/acustici.

Per i piezometri e gli inclinometri si prevede una lettura mensile per almeno un anno solare, con frequenza di lettura che dovrà essere ravvicinata durante gli eventi di forte piovosità.

Nell'eventualità in cui le indagini geognostiche in questa zona confermassero spessori significativi di riocati argillificati e rilevassero indicatori di movimento e/o superfici critiche di rottura, si dovrà procedere allo studio/approfondimento del versante in frana tramite una valutazione con tecnologia tipo interferometria satellitare.



## 6 PARAMETRAZIONE GEOTECNICA

Sulla base dell'osservazione condotta in campagna, sulla base dei dati bibliografici e sulla base dei dati riportati nei logs stratigrafici delle indagini geognostiche pregresse, e' di seguito riportata una parametrizzazione geotecnica preliminare dei principali depositi sciolti rilevati nell'area in esame.

### DEPOSITI ELUVIO-COLLUVIALI

Peso di volume naturale	$\gamma$	= 19.0 kN/m <sup>3</sup>
Angolo d'attrito	$\phi$	= 28°-30°
Coesione reale	C	= 0-2 KPa

### DEPOSITI DETRITICI

Peso di volume naturale	$\gamma$	= 18.0 kN/m <sup>3</sup>
Angolo d'attrito	$\phi$	= 32-34
Coesione reale	C	= 0 KPa

### DEPOSITI ALLUVIONALI FINI IN MATRICE LIMO ARGILLOSA

Peso di volume naturale	$\gamma$	= 19.0-20.0 kN/m <sup>3</sup>
Angolo d'attrito	$\phi$	= 24°-26°
Coesione reale	C	= 0-5 KPa



## 7 PARAMETRAZIONE GEOMECCANICA

La classificazione geomeccanica dell'ammasso adottata per la determinazione della classe della roccia segue in questa fase il metodo proposto da BIENIAWSKI, che consente di pervenire ad una parametrizzazione dell'ammasso roccioso attraverso l'indice "RMR" - Rock Mass Rating.

Il metodo classificativo RMR considera una serie di indicatori, di seguito esposti, ai quali assegna un rating numerico e tiene inoltre conto della direzione di scavo in progetto rispetto ai giunti di discontinuità principali.

In particolare le classi di Bieniawski sono state determinate sulla base dei dati raccolti dalle stazioni di rilevamento precedentemente esposti.

La classificazione RMR tiene conto di sei parametri fondamentali per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso, che sono:

- resistenza a compressione monoassiale (JCS)
- qualità dell'ammasso roccioso, espressa tramite l'indice RQD
- spaziatura delle discontinuità
- condizioni delle discontinuità
- condizioni idrauliche
- giacitura delle discontinuità rispetto all'avanzamento progettato

Ciascuno di questi parametri è suddiviso in cinque classi che corrispondono ad intervalli diversi di ogni caratteristica. L'appartenenza alle varie classi fa attribuire un coefficiente numerico (rating) ai parametri esaminati nel caso specifico, sommando poi i vari coefficienti si ottiene un indice numerico finale variabile da 1 a 100. Questo permette di collocare l'ammasso roccioso in una delle cinque classi terminali indicate con i numeri romani da I a V, che corrispondono rispettivamente ad una qualità della massa da ottima a molto scadente.

A loro volta le classi terminali sono correlate, nella Classificazione di Bieniawski, con delle sintetiche descrizioni qualitative, dei giudizi di massima da attuarsi nei vari casi.

In particolare sono stati calcolati i valori dell'indice RMR di base, corretto che tiene conto degli effetti dovuti alla fratturazione, e secco che elimina il contributo dovuto alla percolazione d'acqua.

Nel caso in esame, e con riferimento a quanto rilevato in campagna e a quanto rilevato nei sondaggi condotti a monte e a valle diga, sono riconoscibili due distinte tipologie di ammasso roccioso, una roccia compatta e poco alterata con valori dell'indice RQD prossimi a 70-100%, e una roccia fratturata e alterata con valori dell'indice RQD variabili dal 30 % al 70%.

Nel corso del sopralluogo condotto nell'aprile 2021 e' stata valutata la resistenza a compressione dell'ammasso roccioso in campagna mediante il martello di Schmidt; i valori medi ottenuti indicano una resistenza pari a 80-100 MPa.



Nell'ambito dell'indagine geognostica 2004-2006 erano state realizzate alcune prove su campioni di roccia per le quali era stato assegnato un valore di resistenza a compressione pari a 42 MPa.

Si e' mantenuto il valore maggiore per la parametrizzazione e classificazione dell'ammasso roccioso di buona qualità, e il valore inferiore per l'ammasso roccioso di mediocre – scadente qualità geomeccanica.

In figura seguente sono riportati i valori attribuiti ai parametri della classificazione RMR; in verde sono evidenziati i parametri per l'ammasso roccioso scadente e in ciano quelli per l'ammasso roccioso di buona qualità geomeccanica.

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS								
Parameter		Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred	
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa		5 - 25 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core Quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%	
	Rating		20	17	13	8	3	
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 . m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm	
	Rating		20	15	10	8	5	
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous	
	Rating		30	25	20	10	0	
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		(Joint water pressy) (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1, - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing	
	Rating		15	10	7	4	0	
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F)								
Strike and dip orientations		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnels & mines	0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes	0	-5	-25	-50			
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS								
Rating	100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Class number	I	II	III	IV	V			
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
D. MEANING OF ROCK CLASSES								
Class number	I	II	III	IV	V			
Average stand-up time	20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2.5 m span	30 min for 1 m span			
Cohesion of rock mass (kPa)	> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100			
Friction angle of rock mass (deg)	> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15			
E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY conditions								
Discontinuity length (persistence)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m			
Rating	6	4	2	1	0			
Separation (aperture)	None	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm			
Rating	6	5	4	1	0			
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slickensided			
Rating	6	5	3	1	0			
Infilling (gouge)	None	Hard filling < 5 mm	Hard filling > 5 mm	Soft filling < 5 mm	Soft filling > 5 mm			
Rating	6	4	2	2	0			
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Moderately weathered	Highly weathered	Decomposed			
Ratings	6	5	3	1	0			

Figura 6 : Tabella Classificazione di Bieniawski

MANDATARIA:

MANDANTI:



Nella tabella seguente sono riassunti gli indici RMR determinati.

RMR di base	Classe	Descrizione qualitativa
64	III ALTA	BUONA
33	IV	SCADENTE

Sulla base dell'osservazione condotta in campagna e sulla base del rilevamento geomeccanico condotto nel corso del sopralluogo di aprile 2021, sulla base dei dati bibliografici e sulla base dei dati riportati nei logs stratigrafici delle indagini geognostiche pregresse, è di seguito riportata una parametrizzazione geomeccanica preliminare delle due principali tipologie di ammasso roccioso rilevate nell'area in esame.

### COMPLESSO VULCANICO DI BUONA QUALITA' GEOMECCANICA

Peso di volume naturale  $\gamma$  = 27 kN/m<sup>3</sup>  
 Angolo d'attrito d'ammasso  $\phi$  = 35°-45°  
 Coesione d'ammasso C = 300-800 KPa  
 CLASSE GEOMECCANICA DI BIENIAWSKI III ALTA  
 QUALITA' GEOMECCANICA DISCRETA = BUONA

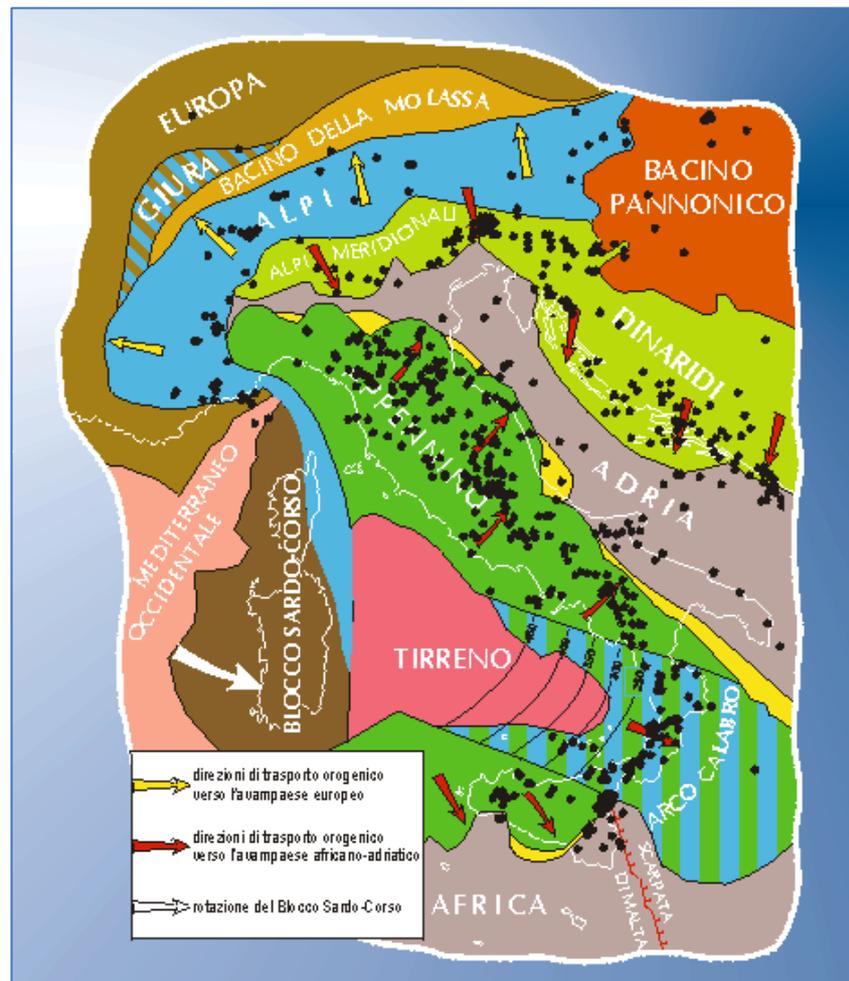
### COMPLESSO VULCANICO DI MEDIOCRE-SCADENTE QUALITA' GEOMECCANICA

Peso di volume naturale  $\gamma$  = 25-26 kN/m<sup>3</sup>  
 Angolo d'attrito d'ammasso  $\phi$  = 25°-30°  
 Coesione d'ammasso C = 100-300 KPa  
 CLASSE GEOMECCANICA DI BIENIAWSKI IV  
 QUALITA' GEOMECCANICA DISCRETA = MEDIOCRE SCADENTE

## 8 SISMICITA' DELL'AREA

Dal punto di vista geologico e geodinamico la Sardegna può essere descritta come un'antichissima zolla continentale, vero relitto Paleozoico isolato e solo parzialmente smembrato a causa della sua rigidità durante la rotazione imposta dall'orogenesi alpina. Pertanto mentre l'Italia, situata nella zona di convergenza fra zolla africana ed eurasiatica, risulta essere uno dei paesi a maggiore rischio sismico del mediterraneo per la frequenza dei terremoti che hanno storicamente interessato il suo territorio, e per l'impatto sociale ed economico di questi eventi, la Sardegna per effetto della sua particolare posizione non registra una attività sismica recente, e si dimostra nel complesso un territorio a modesta pericolosità sismica.

La seguente figura 2 illustra la posizione della Sardegna con riferimento alla rotazione del blocco Sardo Corso ed all'ubicazione dei principali epicentri sismici, mentre in figura 3 è rappresentata la posizione dell'isola rispetto al margine convergente fra zolla africana ed eurasiatica.



**Figura 2** Terremoti nella regione centro-mediterranea con intensità epicentrale superiore o uguale all'VIII grado MCS dall'anno 1000 ad oggi (da: Slejko D. et al., 1999. Seismic hazard assessment for Adria. Ann.Geofis., 42(6), 1085-1107).

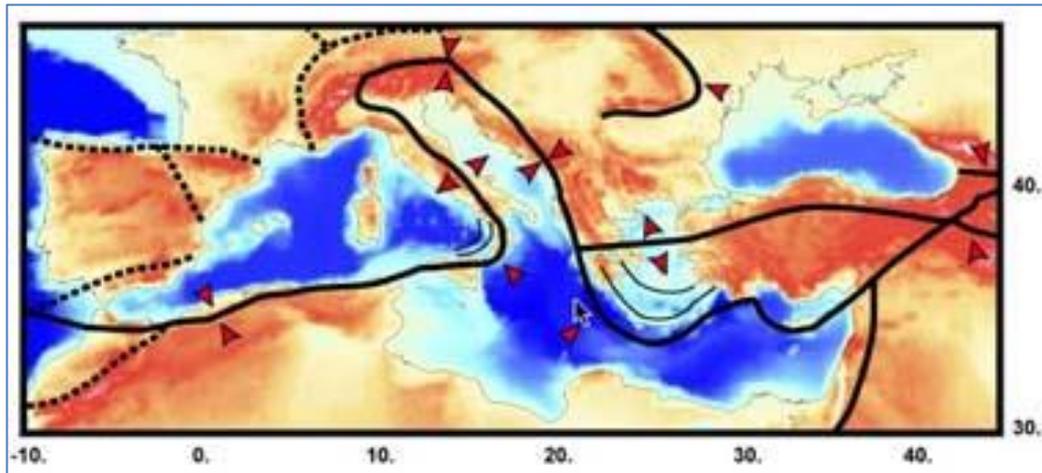


Figura 3. Posizione del blocco Sardo Corso esterna al margine convergente fra placca Africana ed Eurasiatica (fonte: INGV)

Anche la figura 5 riportante la mappa degli epicentri dei terremoti storici in Sardegna conferma la bassa sismicit  sia dal punto di vista della frequenza degli eventi che dei valori di magnitudo attesi.

Tale bassa sismicit  si riflette anche dal punto di vista normativo, tanto che la Sardegna nelle classificazioni sismiche sino al 2003 era interamente considerata area non sismica. Con l'O.P.C.M. 3274 del marzo 2003 tutto il territorio nazionale viene considerato sismico, ed i Comuni dell'isola vengono inseriti in classe 4, ovvero la pi  bassa possibile su scala nazionale.

Per i territori Comunali classificati in zona 4 l'OPCM 2003 lascia facolt  alle singole Regioni di introdurre o meno la progettazione antisismica. La Giunta Regionale con Delibera G.R. 30/03/2004 n  15/31, pubblicata sul B.U. Sardegna del 21 agosto 2004, n  23, recependo la classificazione sismica di cui all'Ordinanza, disponeva di non introdurre la progettazione antisismica.

Con le Norme Tecniche 2008 (NTC2008) per le zone sismiche ricadenti in classe 4 vige la possibilit  di applicare nel dimensionamento delle opere il metodo delle tensioni ammissibili. Con l'aggiornamento di cui alle Norme Tecniche 2018 (NTC 2018) tale possibilit  decade.

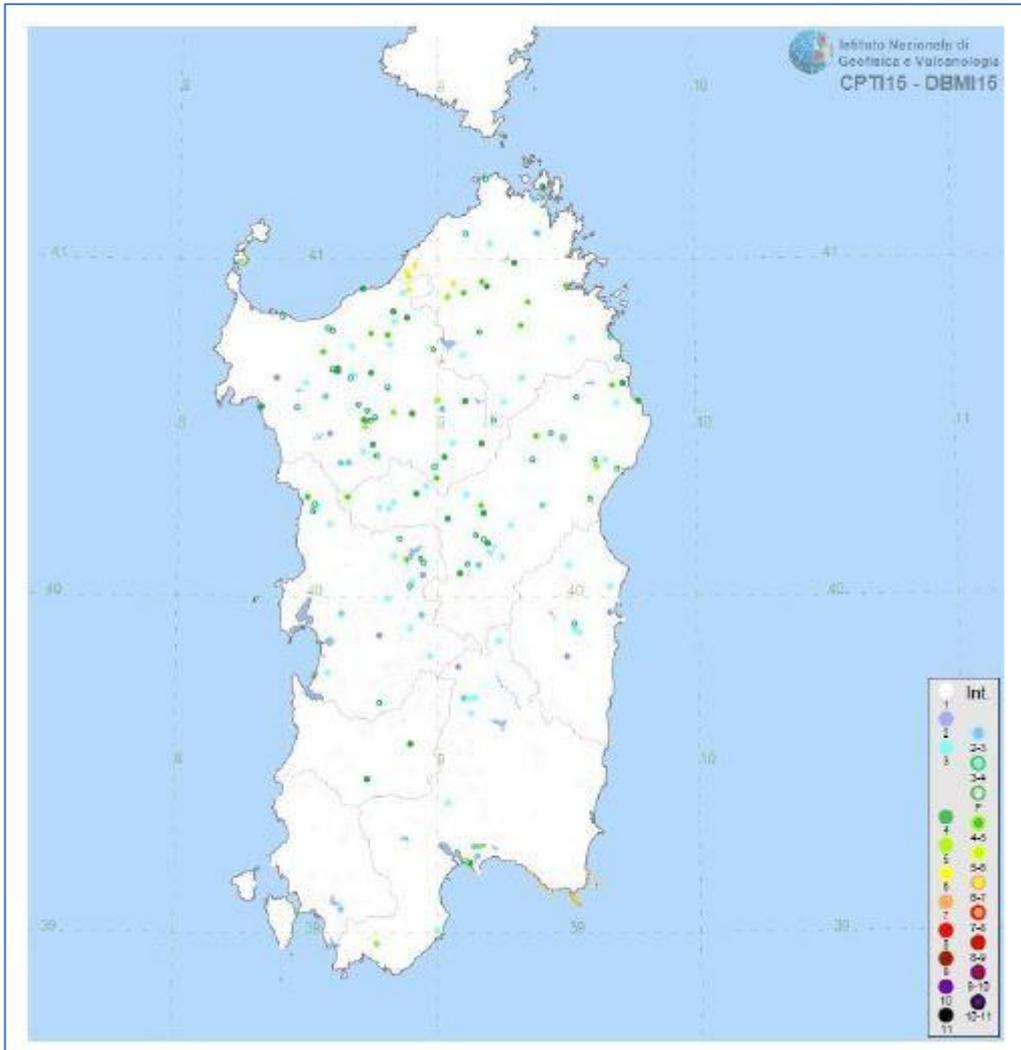


Figura 4 Mappa con gli epicentri dei terremoti storici in Sardegna (fonte catalogo CPTI15)

E' comunque noto che il territorio Nord Orientale e meridionale della Sardegna può risentire sia pur debolmente (MCS 4-5) della sismicità di strutture tettoniche attive sia sul margine Ligure (e più in generale sul mediterraneo occidentale) che di quello tirrenico occidentale e del canale di Sardegna. In tabella seguente si riporta un elenco, tratto dal database dell'INGV, dei più recenti sismi registrati avvertiti nella Sardegna meridionale ed il cui epicentro si colloca in mare a sud di Sarroch – Pula,

Lat:	Lon:	Profondità (km)	Data UTC:	Magnitudo	Provincia evento	Località
38.898	9.000	8.6	24/03/06 10:43	4.1	SOTTOMARINO	Sardegna
38.917	9.023	10	22/03/06 22:45	3.4	SOTTOMARINO	Sardegna



## 9 ANALISI DELLE PROBLEMATICHE DI CARATTERE GEOLOGICO

Le problematiche di carattere geologico riguardano la determinazione degli spessori dei depositi sciolti intercettati dal progetto della galleria lunga rispetto al substrato roccioso, e la corretta parametrizzazione geotecnica e geomeccanica dei materiali intercettati dai lavori nella loro totalità.

Dal punto di vista idrogeologico devono essere verificati i livelli idrici presenti nei depositi di copertura.

Dal punto di vista geomorfologico le principali problematiche riscontrate sono legate a potenziali instabilità di blocchi lapidei lungo le ripide pareti rocciose, e la pregressa e documentata presenza di un possibile fenomeno deformativo a valle della diga in sinistra idrografica.

La campagna geognostica prevista per le successive fasi progettuali fornirà i dati necessari alla determinazione degli spessori reali delle varie unità litostratigrafiche presenti nell'area di progetto.

Le prove di laboratorio e le prove in sito forniranno la corretta parametrizzazione sia geotecnica sia geomeccanica.

I sondaggi previsti lungo il tracciato della galleria permetteranno di verificare la qualità geomeccanica dell'ammasso roccioso attraversato e di individuare eventuali criticità legate al grado di fratturazione e/o all'attraversamento di eventuali strutture particolarmente persistenti.

La campagna geognostica prevista in corrispondenza del tratto superiore del versante di sinistra idrografica, dove è localizzata la possibile frana, permetterà di valutare il reale spessore dello strato fortemente argillificato e le sue caratteristiche geomeccaniche.

Il posizionamento di inclinometri permetterà di monitorare eventuali spostamenti e la loro entità.

L'installazione di piezometri permetterà di verificare e monitorare i livelli idrici.

Particolare attenzione andrà posta al rilevamento geomeccanico delle pareti rocciose ed alla individuazione e dimensionamento degli interventi di messa in sicurezza e mitigazione del rischio da caduta massi.



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

2020\_0275\_002\_GEO\_R001\_0 RELAZIONE GEOLOGICA

## ALLEGATO 1:

## DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



**FOTO 1:** Pareti rocciose a valle diga



**FOTO 2:** Pareti rocciose su spalla diga



**FOTO 3:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 4:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 5:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 6:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 7:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 8:** Pareti rocciose a monte diga



**FOTO 9:** Dettagli Daciti



**FOTO 10:** Panoramica ammasso roccioso in corrispondenza della diga



**FOTO 11:** Panoramica ex bacino diga



**FOTO 12:** Panoramica zona in esame



**FOTO 13:** Panoramica zona in esame



**FOTO 14:** Panoramica zona in esame



**FOTO 15:** Panoramica zona in esame



**FOTO 16:** Panoramica zona in esame



**FOTO 17:** Rio Bunnari in prossimità della Diga



**FOTO 18:** Panoramica zona dello scaricatore



**FOTO 19:** Pareti rocciose a valle diga



**FOTO 20:** Pareti rocciose a valle diga



**FOTO 21:** Pareti rocciose a valle diga



**FOTO 22:** Panoramica versante in sinistra idrografica (zona possibile frana)



**FOTO 23:** Pareti rocciose su spalla destra della diga



**FOTO 24:** Pareti rocciose su spalla destra della diga