



Geologo:



Opera:

CONFIGURAZIONE NELLO STATO ATTUALE E CON
RIFERIMENTO ALLE NTC 2018 DELL'OPERA DENOMINATA
"SBARRAMENTO IS CARRELIS" IN AGRO DI MOGORO (OR)

Scala:

Data:

FEBBRAIO 2023

Oggetto:

RELAZIONE GEOLOGICA

Aggiornamenti:

Rev.00 - 16.02.2023

• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •
• • • • •



STUDIO DI GEOLOGIA TECNICA
DOTT. GEOL. SIMONE MANCONI



ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA N. 513
P.I. 02760610929 - C.F. - MNCSMN74B13B354G
sede operativa: CAGLIARI, VIA PONTANO 11 - 09128
Sede legale: ASSEMINI - VIA PARIGI 9 - 09032
TEL/FAX 070497499
MOBILE: 3286513334
e-mail: geologo.manconi@gmail.com
PEC: geologo.simonemanconi@epap.sicurezza postale.it

INDICE

1.	Premessa.....	3
2.	Analisi dello stato attuale	4
3.	Analisi del quadro di riferimento normativo	22
4.	Ubicazione dell'area in esame	26
5.	L'indagine.....	26
6.	Inquadramento Geologico.....	28
7.	Indagini geognostiche in sito	29
8.	Inquadramento Geomorfologico.....	48
9.	Inquadramento Geopedologico.....	50
10.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea.....	50
11.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lugeon.....	51
12.	Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea – Prova Lefranc.....	54
13.	Considerazioni conclusive.....	55

1. Premessa

Nell'ambito delle analisi e verifiche per la configurazione nello stato attuale e con riferimento alle NTC 2018 dell'opera denominata "Sbarramento Is Carrelis" in agro del Comune di Mogoro (OR), è stato conferito un incarico specialistico allo scrivente Dott. Geol. Simone Manconi, iscritto al n° 513 dell'Ordine dei Geologi della Sardegna.

L'incarico è stato affidato per lo sviluppo delle attività di verifica e analisi previste dalle NTC 2018 e s.m.i. ed in particolare:

- Rilievo topografico dello stato di fatto;
- Restituzione della sezione trasversale dello sbarramento riportante tutte le misure caratteristiche tra cui: altezza dello sbarramento (def. Legge 584/94); quota di massima regolazione; quota di massimo invaso; quota del coronamento; scarico di fondo e relativa quota.
- Indagini geologico-geotecniche necessarie alla redazione delle verifiche statiche e relazioni di corredo;
- Implementazione del calcolo statico dello sbarramento ai sensi delle NTC 2018;
- Documentazione fotografica aggiornata dello sbarramento e delle opere accessorie attestante lo stato manutentivo dell'impianto

Nella presente relazione, in particolare, verranno argomentate le questioni di carattere geologico, geomorfologico e idrogeologico che riguardano i terreni di sedime su cui insiste l'opera, anche in riferimento a tutte quelle condizioni di pericolosità idrogeologica definite dal PAI, dal PSFF ed in linea generale dal PGRA.

L'analisi dei caratteri geologici, geomorfologici e idrogeologici del sito verrà illustrata anche in riferimento all'esecuzione di una campagna di indagini geognostiche, sia dirette sia indirette, che verranno eseguite in corrispondenza dell'area d'intervento ed in un suo congruo intorno, al fine di addivenire a tutto quell'insieme di informazioni ed elementi conoscitivi di dettaglio necessari per lo svolgimento delle verifiche di sicurezza richieste dalla normativa per opere di ritenuta di questo tipo.

La presente, per quanto di competenza, viene redatta in risposta alla richiesta di integrazioni dell'Assessorato ai Lavori Pubblici della Regione Autonoma della Sardegna – Direzione Generale – Servizio Opere Idriche e Idrogeologiche.

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

Nella relazione verranno illustrati i risultati delle indagini sui terreni costituenti il corpo diga e relativa fondazione attraverso la loro caratterizzazione geologica e geotecnica estesa fino a profondità idonee all'opera, utili alla definizione delle condizioni geostrutturali del fondo e delle spalle dello sbarramento.

2. Analisi dello stato attuale

La diga di Is Carrelis è uno sbarramento di ritenuta costruito durante gli anni 90' e terminato nel 1996, utilizzato essenzialmente per scopi irrigui.

L'invaso è stato realizzato per captare le acque relative al proprio bacino imbrifero relativo al Rio Is Carrelis sia le acque prelevate dall'opera di presa ubicata nel vascone di accumulo di Morimenta sistemato in prossimità del Rio Flumini Mannu di Pabillonis e dal canale adduttore Tirso-Arborea tramite una condotta in pressione.

Il corpo del rilevato che costituisce la diga è stato realizzato in materiale sciolto composto in prevalenza da blocchi e massi di roccia basaltica eterometrici, intasati da sabbie e ghiaie in abbondante matrice limo-argillosa.

Per rendere impermeabile lo sbarramento e le arginature sono state realizzate delle specchiature in CLS fino alla quota del coronamento prevista interposizione di telo in geotessile e guaina impermeabile in PVC, così come nel fondo della diga.



Fig.1: Ripresa aerofotogrammetrico dello sbarramento di Is Carrelis

Questa conformazione è rimasta tale fino al periodo attuale, come meglio rappresentato nella documentazione aerofotogrammetrica.



Fig.2: Ripresa aerofotogrammetrico con drone APR dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)

Per un'analisi più dettagliata dello stato dell'opera è stato richiesto lo svuotamento, avvenuto in primis durante il mese di dicembre 2022 e successivamente nel mese di febbraio 2023.

In questi periodi è stato possibile eseguire un rilievo plano-altimetrico di dettaglio dell'area di invaso e delle opere collegate come scarico di fondo e immissioni.

Il rilievo è stato necessario anche per una verifica dello stato complessivo dell'opera e del grado di manutenzione della stessa.

In condizioni di massima regolazione si è potuto constatare che nel paramento di valle non sono state rilevate emergenze o sorgive, così come nel rilevato stradale a perimetro dello sbarramento, non sono stati rilevati fenomenologie riconducibili a cedimenti o abbassamenti per cause dipendenti da infiltrazioni d'acqua.

In ogni caso, per una migliore comprensione di queste condizioni, sono state eseguite delle misure dirette dei potenziali spontanei abbinate ad una tomografia geoelettrica del corpo diga che verranno illustrate nei successivi paragrafi.

Sulla base della documentazione fotografica e a seguito dei rilievi puntuali di dettaglio, è stato possibile accertare che lo sbarramento si trova in un'eccellente stato di conservazione.



Fig.3: Ripresa fotografia drone APR – Vista frontale dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)

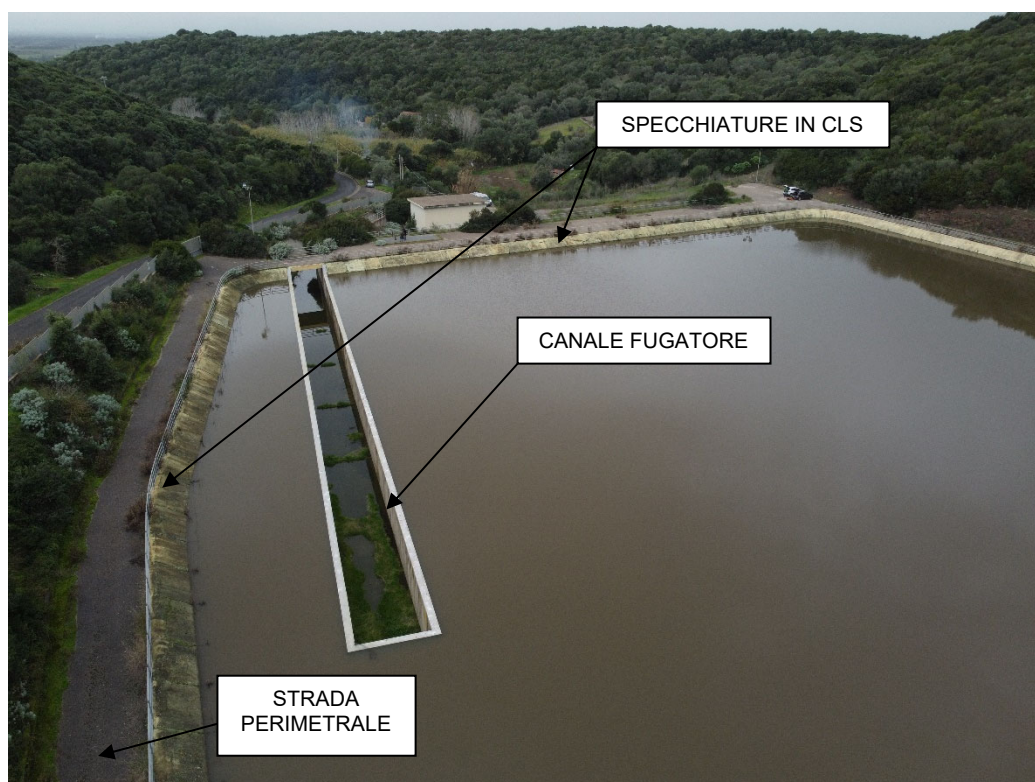


Fig.4: Ripresa fotografia drone APR – Vista posteriore dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)



Fig.5: Ripresa fotografia drone APR – Canale fuggatore dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)



Fig.6: Ripresa fotografia drone APR – Canale fuggatore dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)



Fig.7: Ripresa fotografia drone APR – Corpo diga dello sbarramento di Is Carrelis (Dicembre 2022)



Fig.8: Ripresa fotografia drone APR – Derivazione elemento idrico Fiume_13950 (Dicembre 2022)



Fig.9: Ripresa fotografia drone APR – Derivazione elemento idrico Fiume_13950 (Dicembre 2022)



Fig.10: Ripresa fotografia – Briglia di Derivazione elemento idrico Fiume_13950 (Dicembre 2022)



Fig.11: Ripresa fotografia drone APR – Derivazione elemento idrico Fiume_10958 (Dicembre 2022)



Fig.12: Ripresa fotografia drone APR – Derivazione elemento idrico Fiume_10958 (Dicembre 2022)



Fig.13: Ripresa fotografia – Briglia di Derivazione elemento idrico Fiume_10958 (Dicembre 2022)



Fig.14: Ripresa fotografia – Canale fugatore diga (Dicembre 2022)



Fig.15: Ripresa fotografia – Specchiature con segni di dissesto in corrispondenza di giunti (Dicembre 2022)



Fig.16: Ripresa fotografia – Specchiature con segni di dissesto in corrispondenza di giunti (Dicembre 2022)



Fig.17: Ripresa fotografia – Rilevato stradale da perimetro alla diga (Dicembre 2022)



Fig.18: Ripresa fotografia – Condotte di immissione e di scarico diga



Fig.19: Ripresa fotografica – Condotte di immissione e di scarico diga

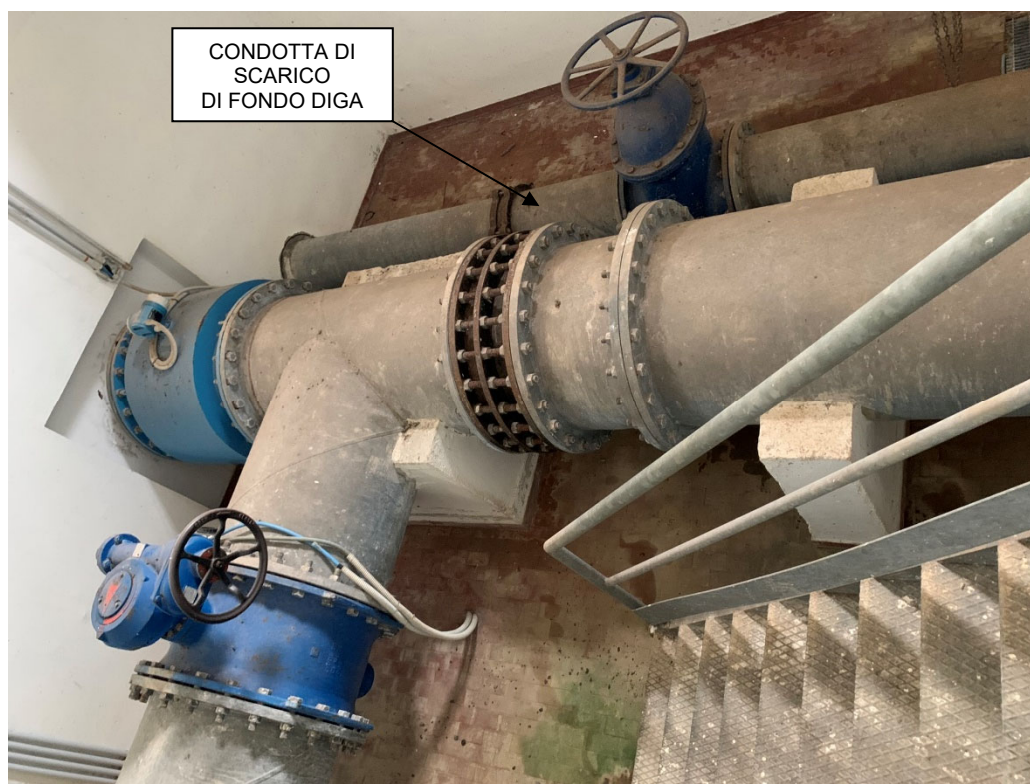


Fig.20: Ripresa fotografica – Condotte di immissione e di scarico di fondo



Fig.21: Ripresa fotografica – Canale fuggatore (Ripresa fotografica verso monte)



Fig.22: Ripresa fotografica – Canale fuggatore (Ripresa fotografica verso valle)



Fig.23: Ripresa fotografica – Invaso svuotato



Fig.24: Ripresa fotografica – Invaso svuotato



Fig.25: Ripresa fotografica – Invaso svuotato (in lontananza punti di presa e scarico)



Fig.26: Ripresa fotografica – Invaso svuotato



Fig.27: Ripresa fotografica – Invaso svuotato – Rilevamento quota scarico

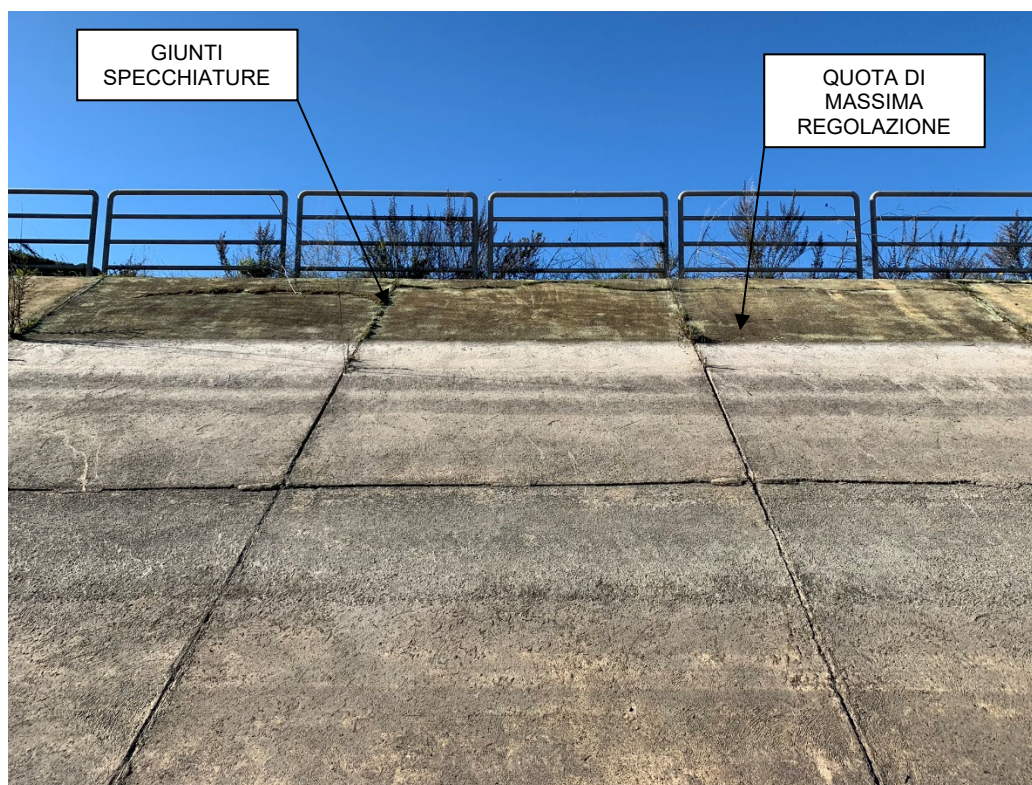


Fig.28: Ripresa fotografica – Particolare dei giunti delle specchiature e livello di massimo invaso



Fig.29: Ripresa fotografica – Invaso svuotato – Misura diametro opere di presa e scarico (800 mm)



Fig.30: Ripresa fotografica – Invaso svuotato – Giunti specchiature con segni di sviluppo vegetativo



Fig.31: Ripresa aerofotogrammetrica – Invaso svuotato – si noti la presenza dello scarico di fondo



Fig.32: Ripresa aerofotogrammetrica – particolare condotta di presa irrigua D= 800 mm



Fig.33: Ripresa fotografica – particolare condotta di presa irrigua D= 800 mm e dello scarico di fondo D=400 mm



Fig.34: Ripresa fotografica – particolare condotta di immissione da Morimenta D= 800 mm

3. Analisi del quadro di riferimento normativo

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, non sempre compatibili, oltre che 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 CNR UNI 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. Queste condizioni possono essere tuttavia superate qualora vengano utilizzati dei sistemi di tenuta idraulica artificiali come ad esempio i teli in PVC o HDPE.

Appare evidente che eventuali problemi idraulici e strutturali del corpo del rilevato devono essere esaminati con particolare scrupolo, al fine di intervenire, se necessario, 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 eseguite in condizione ex-post è stato proposto il seguente modello che rappresenta le condizioni dello sbarramento in condizioni ex-ante ed ex-post.

Nella condizione *attuale* le caratteristiche dello sbarramento di Is Carrelis possono essere così rappresentate:

- quota del coronamento:	97.45 m slm
- quota sfioratore:	96.30 m slm
- quota di massimo regolazione:	96.30 m slm
- quota di minima regolazione:	88.24 m slm
- quota piede di valle/fondo lago:	89.88 m slm
- altezza diga:	9.21 m
- quota iniziale del canale fugatore:	96.30 m slm

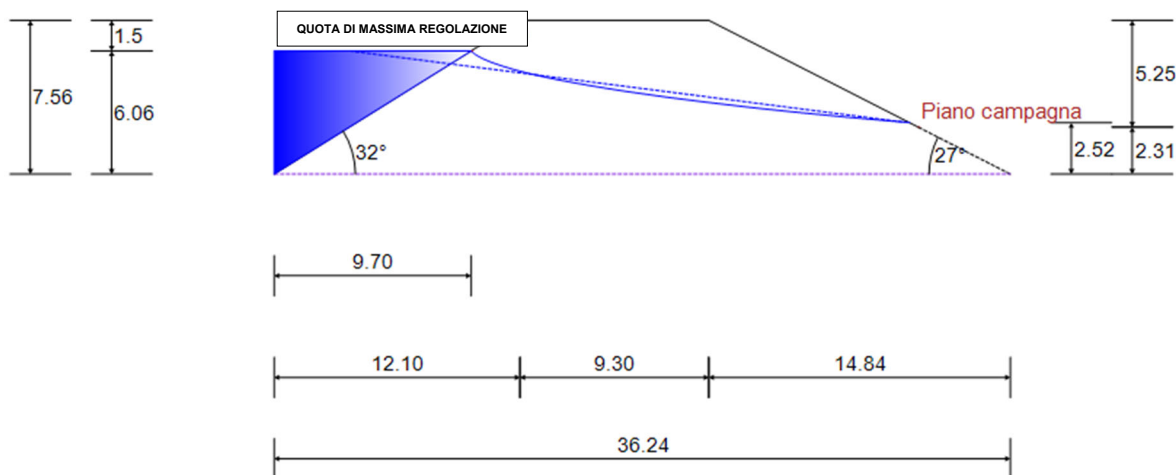


Fig.35: Rappresentazione schematica della linea di saturazione per la Diga di Is Carrelis

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 si 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, l'attività consiste nelle verifiche geologiche geotecniche e sismiche del corpo diga secondo quanto disciplinato dalle norme attuali.

Pertanto, come ad esempio nei casi di riparazione o ripristino delle condizioni di permeabilità, gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi dello sbarramento e interesseranno porzioni limitate della diga.

Quindi, appare evidente che 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 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. 539 "Mogoro", dell'I.G.M.I. (scala 1:50.000);
- Foglio n. 539, sez. III "Mogoro, dell'I.G.M.I. (scala 1:25.000);
- Foglio n. 539, sez. 090 "Uras Sud", CTR (scala 1:10.000);
- Foglio n. 539, sez. 100 "Mogoro", 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 Mogoro;
- 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

6. Inquadramento Geologico

Il settore oggetto di intervento, è localizzato a valle dell'altopiano basaltico di Sa Struvina laddove si rinvencono in prevalenza rocce vulcaniche plio-quaternarie del distretto vulcanico del Monte Arci, che hanno colmato durante il pliocene delle originarie paleo-valli che nel corso del tempo si sono erose lasciando affiorante il substrato vulcanico (più resistente all'erosione), dando luogo ad una così detta inversione del rilievo.

Conferma di quanto soprariportato si evince proprio lungo la strada provinciale che dalla SS 131 porta a Mogoro dove, in corrispondenza dei tornanti affiorano le successioni mioceniche calcarenitiche e micro-conglomeratiche che si trovano al di sotto delle successioni basaltiche plio-quaternarie.

Queste litologie, estremamente alterate e dislocate, risultano ricoperte a loro volta da depositi eluvio-detritici comprendenti anche un livello di alterazione del substrato basaltico avente spessore decimetrico, talora metrico.

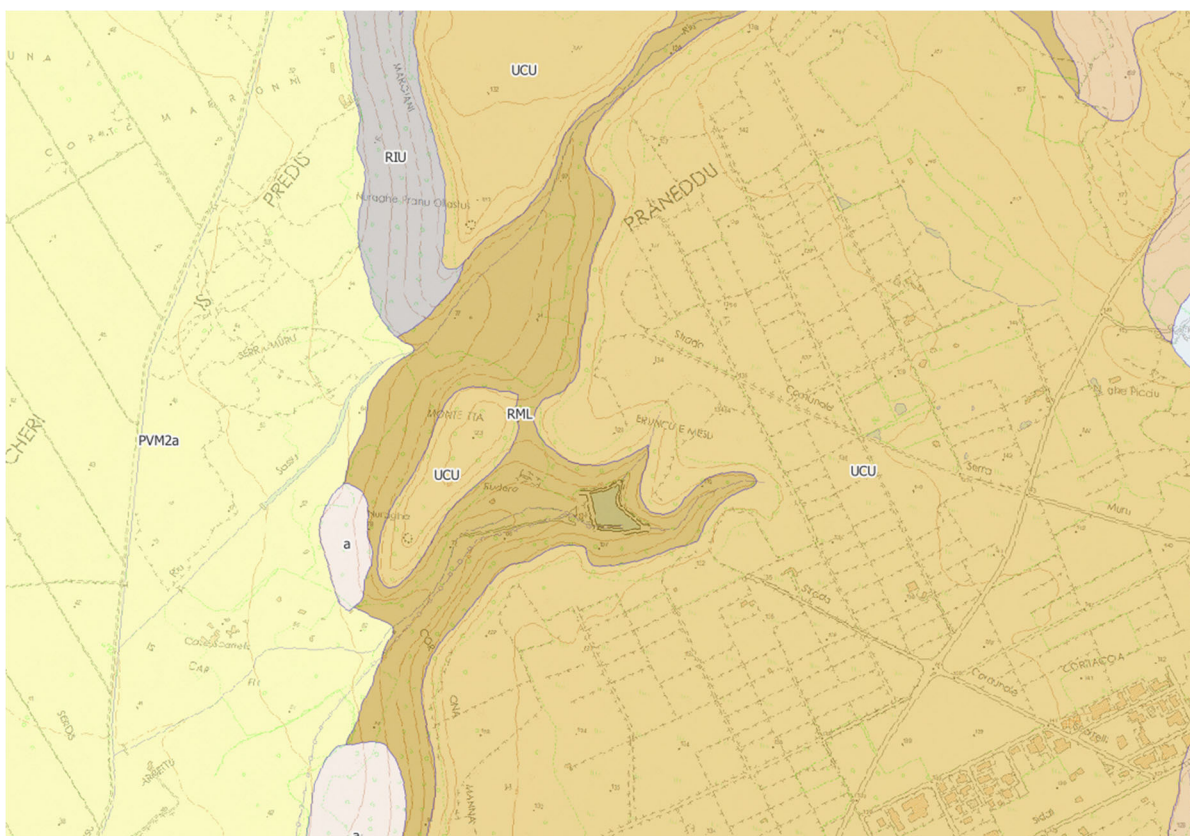


Fig.36: Stralcio carta geologica CARG -ISPRA relativa alla zona d'intervento

Come meglio evidenziato nella legenda stratigrafica, la zona d'intervento è caratterizzata dalla presenza di litologie basaltiche dell' Unità di Cuccuru Aspru, costituita da Basalti subalcalini

generalmente ipocristallini da afirici a porfirici per fenocristalli di Pl, Opx, Cpx, Ol; in colate e Basalti da alcalini a transizionali, generalmente olocristallini, da subafirici a porfirici.

Come meglio evidenziato nello stralcio della carta geologica si rilevano alla base i sedimenti marini miocenici della Formazione della Marmilla, costituiti da marne siltose alternate a livelli arenacei da mediamente grossolani a fini, talvolta con materiale vulcanico rimaneggiato riconducibili al Miocene inferiore (Aquitano – Burdigaliano).

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.

7. Indagini geognostiche in sito

La campagna di indagini è stata programmata per 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.

In particolare, attraverso le indagini indirette si è cercato di identificare l'assetto strutturale del corpo del rilevato e contestualmente definire le potenziali zone di filtrazione all'interno del corpo del rilevato.

Per quanto concerne le indagini geofisiche indirette, sono state eseguite complessivamente due prospezioni geofisiche: la prima è una tomografia geoelettrica con misura dei potenziali spontanei, la seconda è una tomografia sismica necessaria alla valutazione dello stato di addensamento del corpo del rilevato.

I risultati delle indagini verranno illustrate nella presente relazione e nei rispettivi allegati.

Nella prospezione geoelettrica il parametro fisico che si determina è la resistività elettrica delle formazioni che costituiscono il sottosuolo. La geoelettrica si basa sul principio che le rocce sono conduttrici di elettricità, e tale capacità di condurre corrente varia a seconda del tipo di roccia, delle sue condizioni (alterazione, fessurazione, porosità, ecc.), del suo contenuto d'acqua, del contenuto di minerali come solfuri e ossidi, dal grado di salinità dell'acqua contenuta nei pori.

Perché l'indagine geoelettrica permette di ricostruire un modello interpretativo del sottosuolo, si può avere attraverso un utilizzo mirato della stessa una stima della stratigrafia a piccola, media e grande profondità e per la ricerca di accumuli idrici sotterranei.

Nell'ambito delle metodologie geofisiche correntemente utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, un notevole contributo è dato dalle prospezioni di tipo geoelettrico le quali consistono nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, permette di evidenziare efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, fornendo così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, etc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sull'individuazione di fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli.

Allo scopo di definire la più appropriata metodologia d'intervento è di fondamentale importanza la definizione dell'assetto stratigrafico di dettaglio, l'individuazione di eventuali acque d'infiltrazione sub superficiali o di acquiferi a media profondità.

È noto come l'acqua sia un elemento particolarmente destabilizzante e spesso costituisce la causa innescante dei movimenti franosi oltreché spesso dei cedimenti strutturali.

In questo lavoro si presenta una tipologia d'approccio utilizzata per l'analisi dei dati ottenuti con il metodo geoelettrico. Di fatto esso rappresenta una metodologia di ricognizione capace di individuare la distribuzione più probabile di anomalie di resistività, visualizzando la geometria dei corpi sepolti all'interno del volume del sottosuolo esplorato.

Tale approccio si differenzia da quelli adottati nei metodi classici d'inversione, i quali, basandosi sul procedimento della deconvoluzione dei minimi quadrati, operano un confronto tra il modello del sottosuolo ottenuto sperimentalmente ed un modello teorico, attraverso test di bontà del confronto. Ciò implica, però, l'assegnazione a priori di alcuni parametri da parte dello sperimentatore, per interpretare il problema geofisico. Il metodo d'inversione tomografica qui utilizzato si svincola da questa procedura, utilizzando un algoritmo che è completamente indipendente dai parametri introdotti a priori.

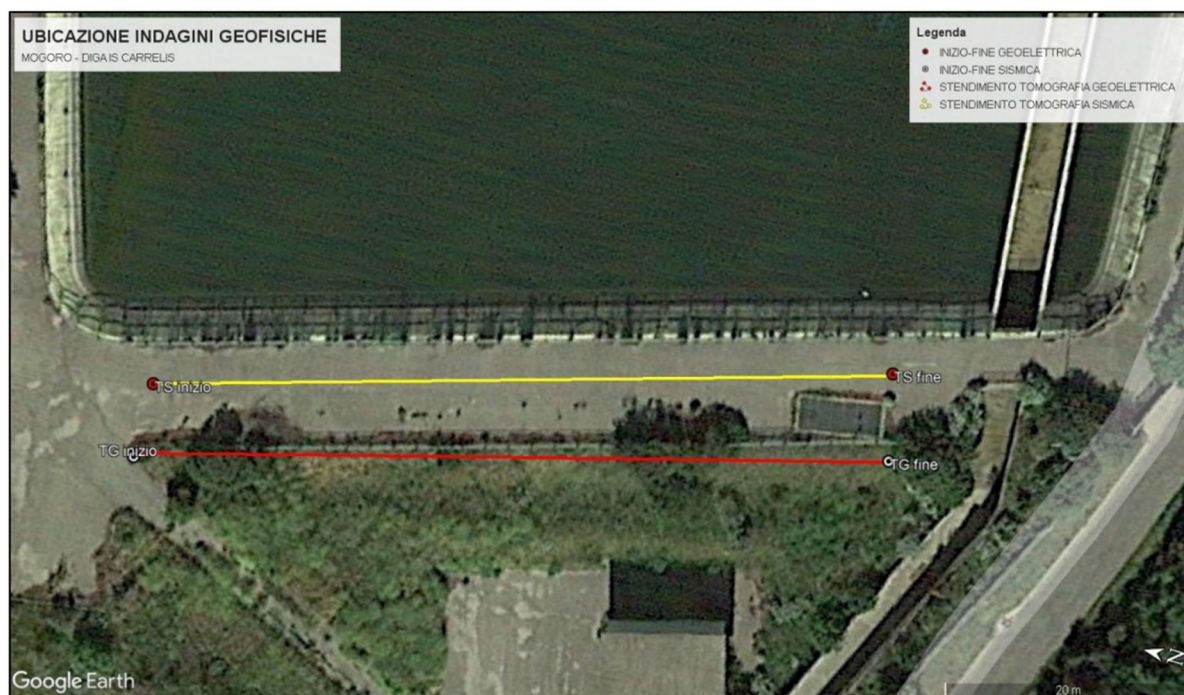


Fig.37: planimetria ubicazione stendimento sismico (giallo) e stendimento geoelettrico (rosso)



Acquisizione delle misure geoelettriche



Vista stendimento cavi



Collegamento elettrodo-cavo



Vista stendimento cavi

Fig.38: planimetria ubicazione stendimento sismico (giallo) e stendimento geoelettrico (rosso)

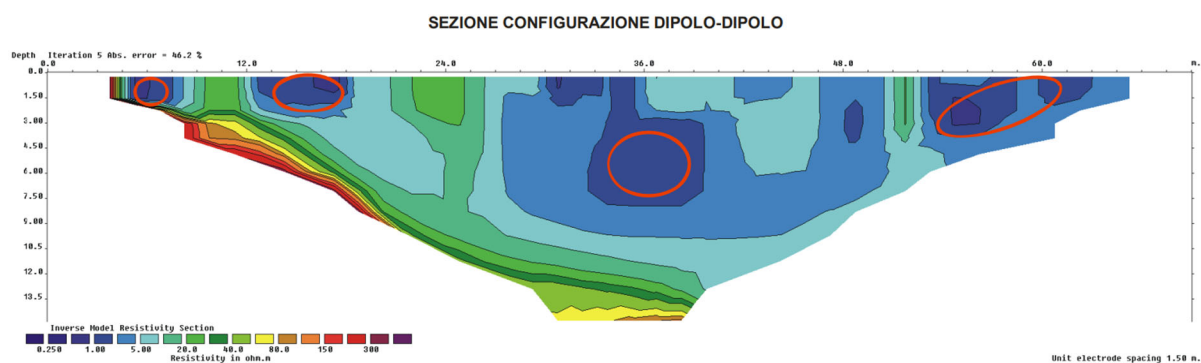


Fig.39: Schema configurazione dipolo-dipolo

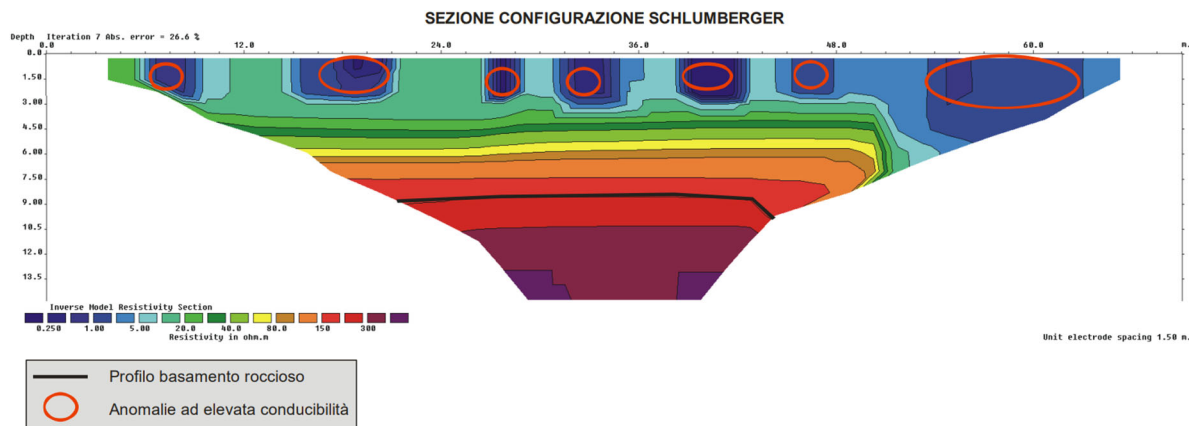


Fig.40: Schema configurazione Shlumberger

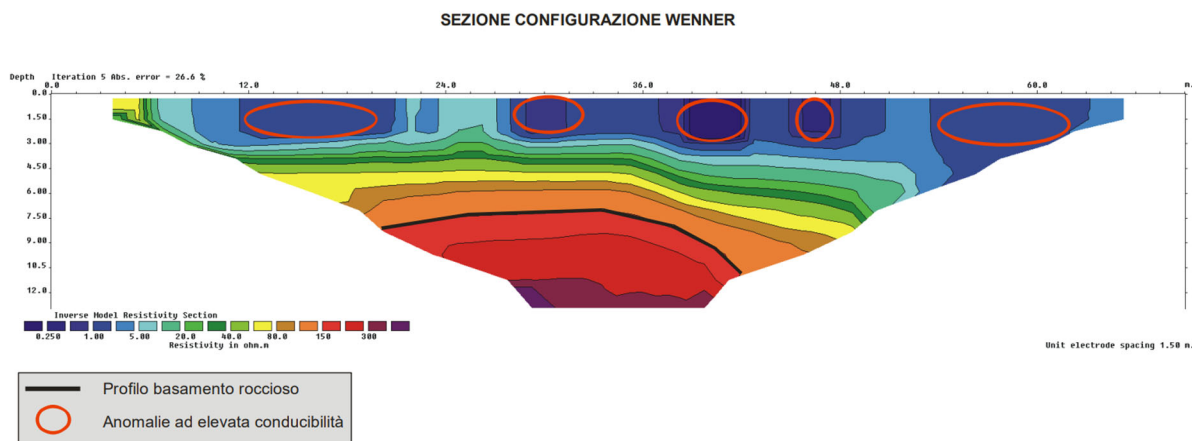


Fig.41: Schema configurazione Shlumberger

Sono state sviluppate complessivamente tre tipologie di schemi geoelettrici:

- 1) Schema configurazione dipolo-dipolo
- 2) Schema configurazione di Shlumberger
- 3) Schema configurazione Wennwe

Nel complesso, come meglio specificato nella relazione a corredo delle indagini, viene evidenziata una difformità tra la risultante dello schema dipolo-dipolo e gli altri due schemi (Wenner e Shlumberger). In particolare, nello schema dipolo-dipolo vengono evidenziate due anomalie di conducibilità all'interno del corpo del rilevato che farebbero pensare a delle perdite idriche. Tuttavia, da una attenta analisi dei sottoservizi della diga, la parte centrale dell'anomali corrisponde esattamente alla tubazione dello scarico di fondo (DIN 400 mm in acciaio) e della tubazione di scarico irriguo (DIN

800 mm in acciaio). Mentre la parte a destra corrisponderebbe in parte alla camera di manovra sistemata sul corpo del rilevato.

In effetti, come meglio identificato nelle sezioni longitudinali e trasversali del corpo diga, la quota dello scarico di fondo risulta essere sistemata ad una quota di circa 9.17 metri, corrispondente al punto di sistemazione delle due condotte. Inoltre, considerato che il materiale della tubazione è in acciaio e quindi un materiale altamente conduttibile, si ritiene più plausibile un'interpretazione di questo tipo piuttosto che un'anomalia del segnale.

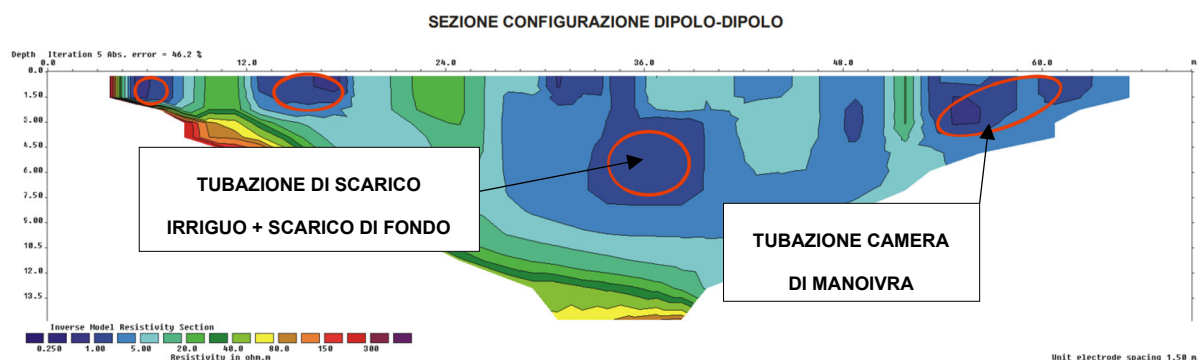


Fig.42: Schema configurazione dipolo-dipolo

Le sezioni evidenziano un andamento elettrostratigrafico caratterizzato dalla presenza di una copertura superficiale irregolare costituita da settori caratterizzati da resistività bassa ($0.5 \Omega m < p < 2 \Omega m$) attribuibile alla parte più superficiale del corpo della diga, formato da terreni molto umidi, anche per via della vegetazione arbustiva presente;

infatti, l'abbondante humus presente nel terreno, contribuisce ad abbattere notevolmente i valori di resistività. Oltre i 3-4 m di profondità i valori di resistività crescono repentinamente individuando la parte più interna del corpo della diga, caratterizzata da valori di resistività medi ($20 \Omega m < p < 100 \Omega m$) compatibili con materiali a tenori di umidità normale.

Oltre i 7-8 m di profondità i valori di resistività salgono raggiungendo l'ordine delle centinaia di Ohm-metro, compatibili con un substrato litoide.

Tutti in punti di anomalia di conducibilità individuati nello schema di Wenner e di Schlumberger sono sub superficiali, pertanto si attribuiscono a valori puntuali di bassa resistività legati alla combinazione della presenza di humus con elevati tenori di umidità in terreno argilloso. Pertanto non si ritiene che possano interessare il corpo profondo della diga.

Oltre ai metodi classici illustrati (Dipolo-dipolo, Schema di Wenner e schema di Schlumberger) è stata eseguita un'indagine geoelettrica con il metodo della polarizzazione indotta, che rappresenta un metodo ancora oggi largamente utilizzato nell'esplorazione mineraria e nello studio di livelli argillosi in sistemi alluvionali.

Con questo metodo, 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.

Il fenomeno fisico può essere spiegato modellando il terreno come una distribuzione di condensatori che si caricano e si scaricano attraverso delle resistenze. Il tempo richiesto per ripristinare le condizioni di equilibrio è funzione del grado di polarizzabilità del terreno.

I principali fattori che determinano la PI sono:

- la composizione mineralogica,
- la tessitura,
- la percentuale d'acqua (umidità naturale),
- la composizione chimica dell'acqua interstiziale (elettrolita)

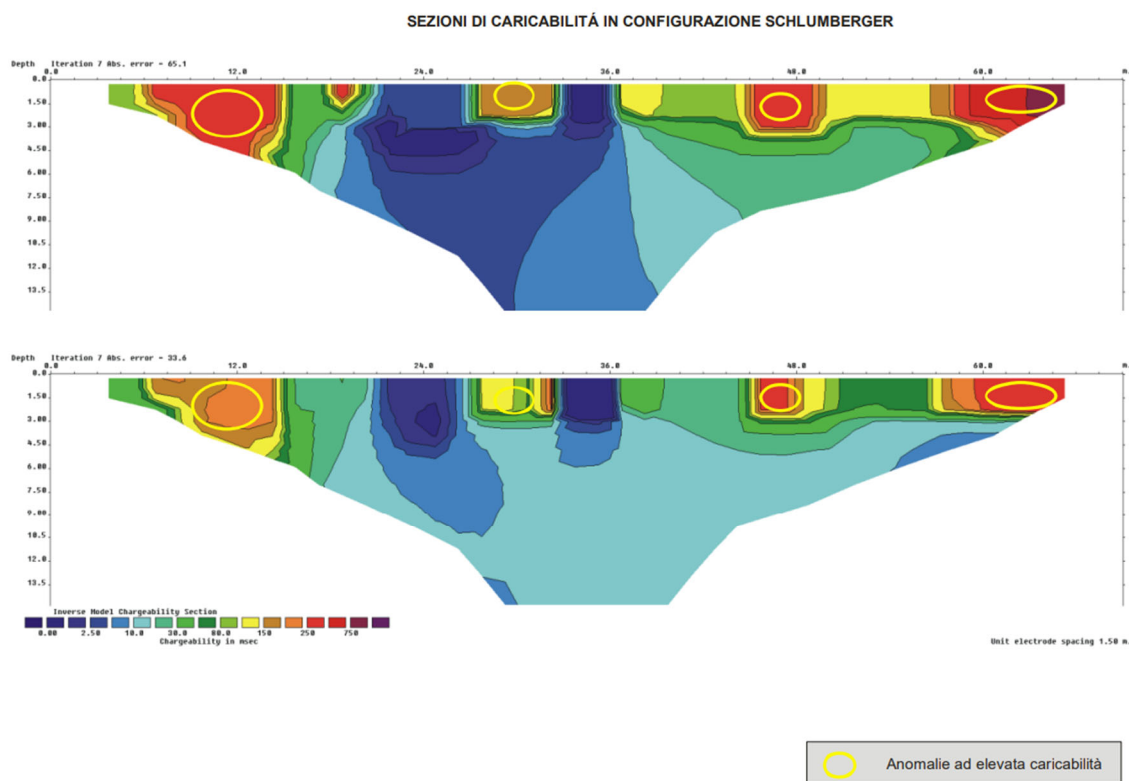


Fig.43: Schema sezioni polarizzazione indotta

Le misure di polarizzazione indotta o caricabilità sono state condotte nella configurazione di Schlumberger, questa presenta infatti il vantaggio di avere un miglior rapporto segnale-disturbo rispetto alla configurazione dipolo-dipolo, fattore fondamentale vista la delicatezza della misura effettuata poiché in questi casi si hanno in genere dei valori di caricabilità piuttosto bassi e pertanto particolarmente soggetti a disturbi.

L'indagine ha individuato diversi settori puntuali caratterizzati da caricabilità anomala rispetto al corpo incassante costituito dal rilevato in terra della diga, distribuiti nel settore superficiale della sezione geoelettrica e ubicati in adiacenza ai settori altamente conduttivi.

Anche in questo caso si ritiene la caricabilità misurata sia dovuta alla presenza di acqua in una matrice limoso-sabbiosa superficiale con abbondante presenza di sostanza organica (humus), quindi non riconducibili a possibili infiltrazioni di acqua all'interno del corpo della diga, anche per l'aumento repentino dei valori di resistività all'interno del corpo del rilevato.

Le indagini geoelettriche sono state completate dalle indagini sismiche sul corpo del rilevato arginale, al fine di una sua parametrizzazione geomeccanica sulla base delle caratteristiche fisiche.

Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consiste nel creare delle onde sismiche artificiali nel terreno (energizzazione) battendo una piastra poggiata a terra con una mazza. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità; questa dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fatturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, ecc.

La prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura del tempo impiegato dalla perturbazione elastica indotta nel terreno, a percorrere la distanza tra sorgente e geofoni. La velocità di propagazione dell'onda longitudinale rifratta dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla conformazione dei terreni attraversati. Ne risulta che la relazione velocità dell'onda e distanza sorgente – geofono (dromocrona) consente, applicando degli algoritmi, di risalire agli spessori degli strati del sottosuolo con caratteristiche elastiche differenti e crescenti con l'aumentare della profondità.

Le procedure di inversione rientranti nella famiglia delle tomografie sono volte a fornire un'immagine dettagliata della distribuzione all'interno della terra di un parametro fisico riconducibile alle misure effettuate.

Nel caso della tomografia sismica si otterrà un'immagine relativa alla velocità delle onde sismiche.

L'esecuzione della prova sismica è simile alla metodologia impiegata per la sismica a rifrazione. La differenza è nel numero di battute necessarie; infatti, per risolvere i complicati calcoli iterativi che sono nascosti dietro il metodo tomografico è necessario compiere almeno una battuta ogni 6 geofoni, a differenza della sismica a rifrazione che al limite consente addirittura l'interpretazione con una sola battuta.

È comunque un'indagine indiretta non invasiva e veloce da eseguire, per cui è adatta per le prime fasi di progettazione per definire le caratteristiche del problema geotecnico.

La tomografia sismica consente di ottenere un'immagine dettagliata del sottosuolo superando in parte i limiti della sismica a rifrazione tradizionale. Quest'ultima tecnica, infatti, non consente di individuare forti variazioni laterali di velocità, risente in modo catastrofico delle inversioni di velocità, la presenza di gradini viene male interpretata. La tomografia sismica, al contrario, consente di superare questi problemi.

Il profilo sismico è stato eseguito utilizzando 24 geofoni con interdistanza di 3 m, i punti di energizzazione sono stati 6, di cui due esterni, distribuiti simmetricamente rispetto al centro dello stendimento. La sezione di campagna investigata con la sismica a rifrazione viene rappresentata mediante "sismostrati" sulla base delle velocità della Vp registrate.

I risultati vengono graficamente rappresentati con una sezione in cui le diverse scale cromatiche indicano le diverse velocità delle onde Vp misurate, con una certa soluzione di continuità, diversamente dalla rappresentazione con il metodo GRM, dove gli stacchi tra un sismostrato e l'altro sono bruschi e repentini.

Per poter meglio visualizzare la stratigrafia ottenuta viene utilizzata una scala cromatica, con colori che passando dall'azzurro scuro, al verde fino al giallo-rosso, rappresentano velocità delle Vp (in m/s), via via sempre più elevate.

L'indagine sismica ha individuato un primo livello piuttosto spesso e omogeneo costituito da terre mediamente a molto addensate con $500 \text{ m/s} < V_p < 1000 \text{ m/s}$, che individua il corpo della diga vero e proprio.

Oltre gli 8 m di profondità la velocità della Vp cresce repentinamente, passando in pochi metri da circa 1200 m/s a circa 2000 m/s oltre i 12 m di profondità. Le Vp con velocità comprese tra 1000 m/s e circa 2000 m/s individuano un substrato lapideo piuttosto alterato e fratturato. Mentre a partire dai 16 m di profondità si rilevano delle $V_p > 3000 \text{ m/s}$, che individuano un substrato roccioso piuttosto massivo, arrivando a misurare Vp massime di circa 4800 m/s.

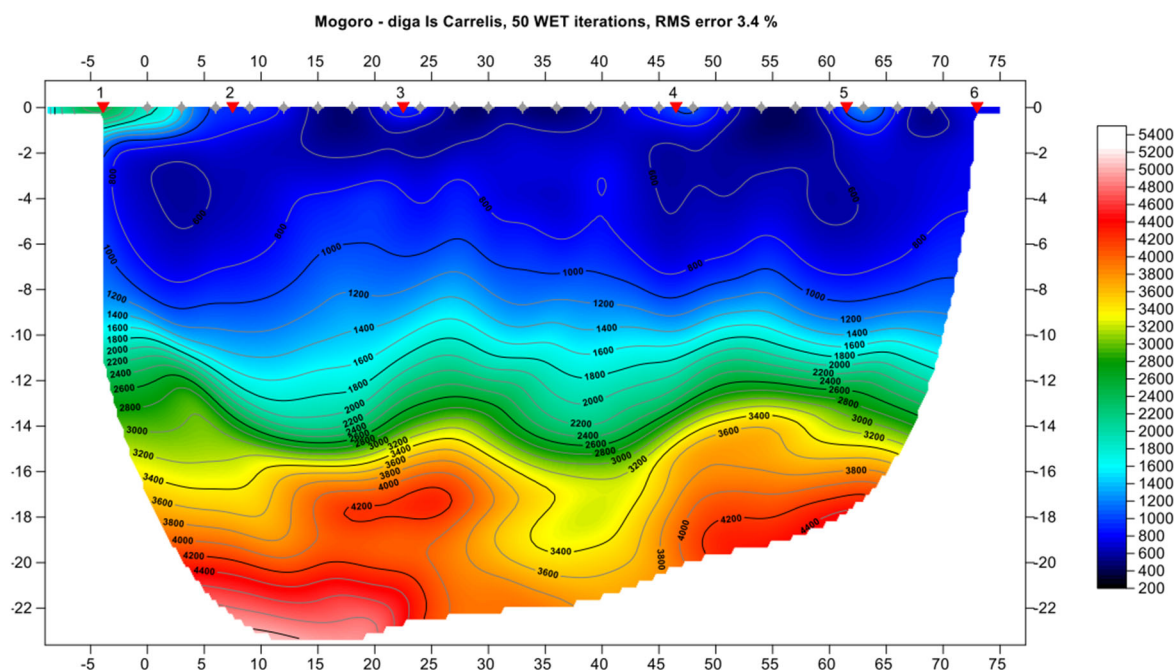


Fig.44: Tomografia sismica – si evidenzia l'omogeneità del corpo del rilevato $V_p = 800 \text{ m/s}$

A completamento delle indagini indirette è stata eseguita inoltre una misura della categoria del sottosuolo secondo quanto richiesto dalle NTC 2018 e s.m.i.

Per la definizione della categoria del sottosuolo è stata eseguita un'indagine con la tecnica MASW, la quale consente di misurare la velocità delle onde di taglio V_s sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga.

Questa proprietà si chiama dispersione. Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.

L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle V_s .

Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione

del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S.

L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

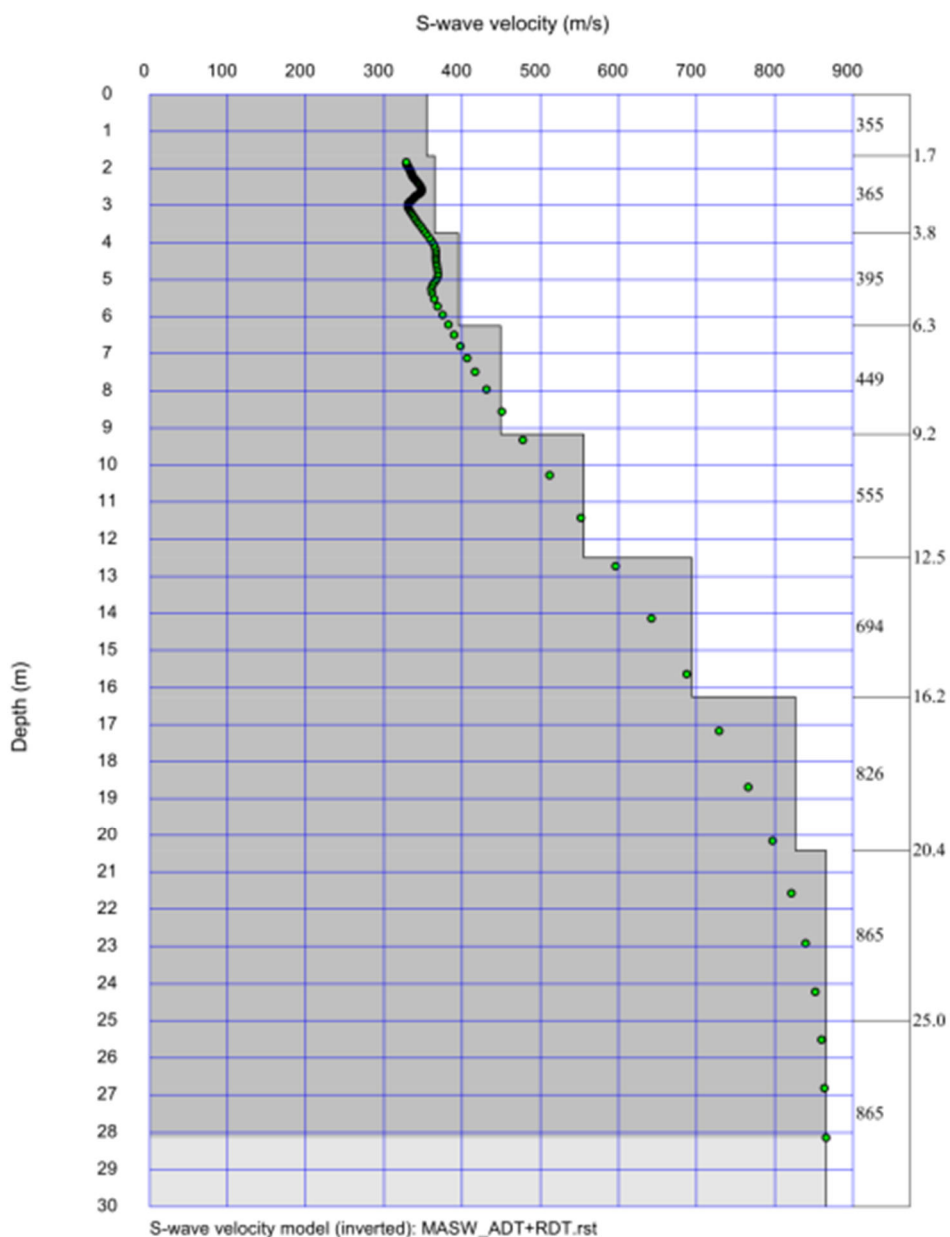


Fig.45: Curva dispersione MASW – $V_s = 480$ m/s

Stratigrafia Vs MASW 01								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	γ_1 (kN/m ³)	Vs (m/s)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Corpo diga	18,7	355	6626	151	0,019
2	3,7	2,1		18,8	365	6860	192	0,023
3	6,3	2,5		19,2	395	7572	247	0,025
4	9,2	2,9	Basamento lapideo alterato	19,8	449	8887	326	0,026
5	12,5	3,3	Basamento lapideo	20,9	555	11583	458	0,024
6	16,2	3,7		22,1	694	15317	642	0,021
7	20,4	4,2	Basamento lapideo massivo	23,1	826	19041	867	0,020
8	25	4,6		23,3	865	20172	995	0,021
9	-	-		23,3	865	20172	-	-

Fig.46: Tabella stratigrafia Vs = 480 m/s

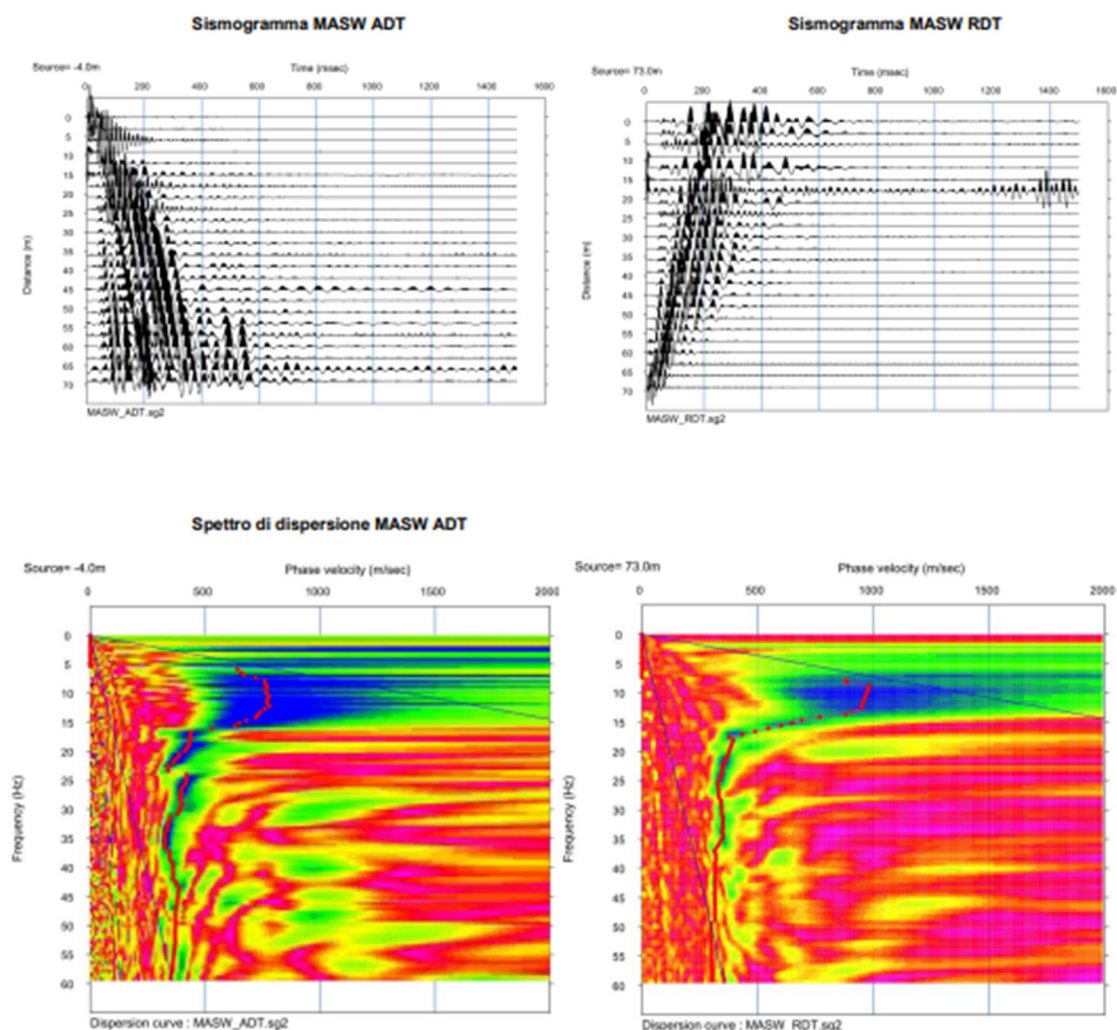


Fig.47: Sismogrammi MASW

L'indagine sismica MASW ha riscontrato la presenza di un substrato rigido con $V_s > 800$ m/s entro i primi 30 m di profondità; pertanto, la velocità della V_s equivalente è stata calcolata utilizzando le V_s misurate fino alla profondità del basamento rigido, coerentemente alle prescrizioni delle NTC 2018.

La V_s equivalente misurata a partire dal coronamento della diga è stata pari a **468 m/s**, a cui corrisponde una categoria di sottosuolo di tipo **B**.

La V_s equivalente misurata a partire dal presunto livello di imposta della diga sul substrato di sedime è stata pari a **510 m/s**, a cui corrisponde una categoria di sottosuolo sempre di tipo **B**.

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.

Fig.48: tabella categoria di sottosuolo

Le indagini dirette si sono composte in n° 2 sondaggi geognostici a carotaggio continuo eseguiti anche sul corpo diga a partire dalla quota del coronamento fino ad una profondità massima di circa 15 metri.

Dei 2 sondaggi eseguiti, n° 1 sondaggio è stato eseguito al piede del rilevato fino ad una profondità corrispondente al basamento lapideo miocenico.

I sondaggi geognostici sono stati eseguiti dalla ditta Angius Antonello con direzione lavori a cura del sottoscritto dal 13 dicembre al 17 dicembre.

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

**CONFIGURAZIONE NELLO STATO ATTUALE E CON RIFERIMENTO ALLE NTC 2018 DELL'OPERA DENOMINATA
"SBARRAMENTO IS CARRELIS" IN AGRO DI MOGORO (OR)**

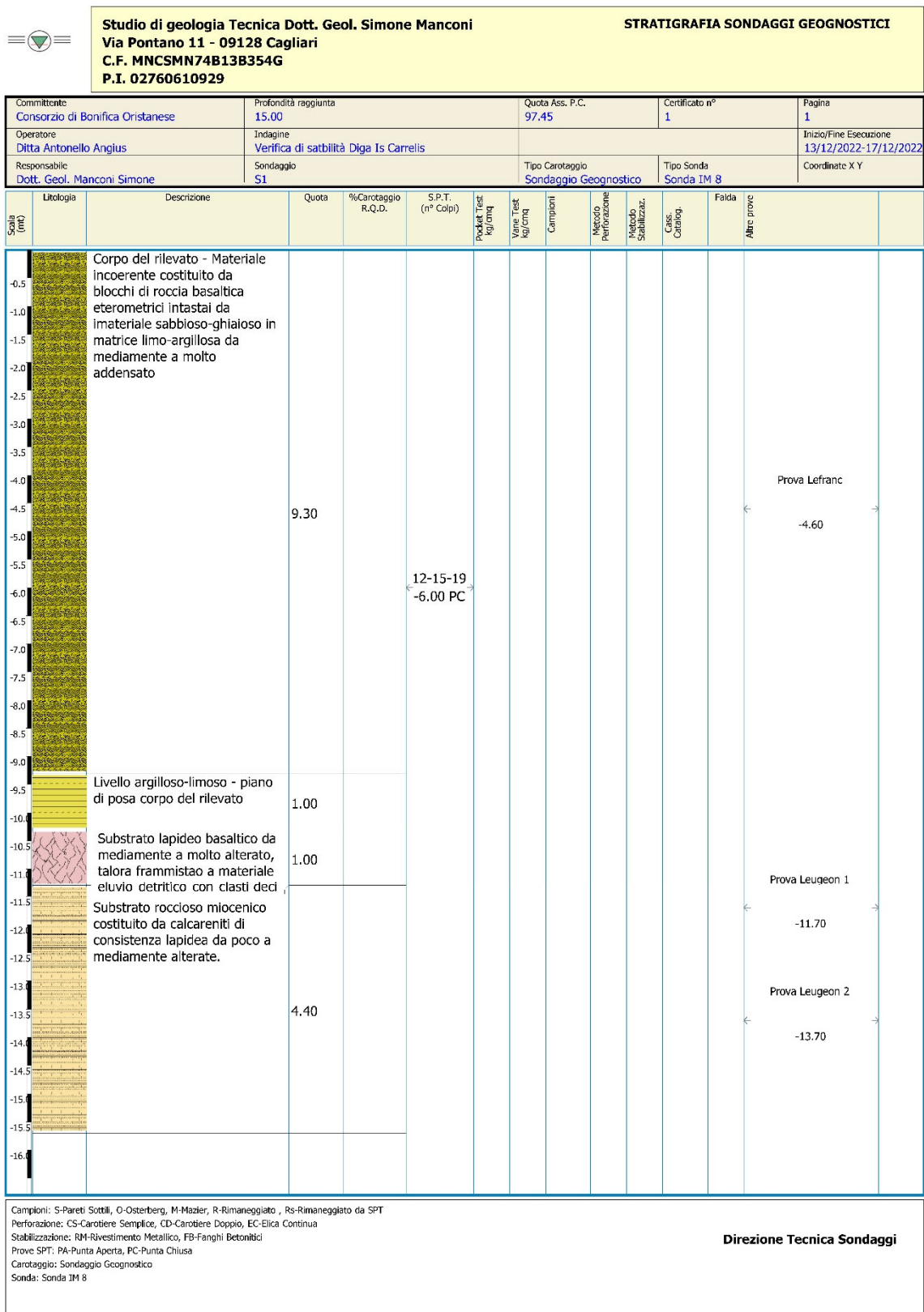


Fig.49: Colonna stratigrafica sondaggio geognostico S1



Fig.50: Cassetta catalogatrice sondaggio S1 (0.00 m – 5.00 m)



Fig.51: Casseta catalogatrice sondaggio S1 (5.00 m – 10.00 m)



Fig.52: Cassetta catalogatrice sondaggio S1 (10.00 m – 15.70 m)

**CONFIGURAZIONE NELLO STATO ATTUALE E CON RIFERIMENTO ALLE NTC 2018 DELL'OPERA DENOMINATA
"SBARRAMENTO IS CARRELIS" IN AGRO DI MOGORO (OR)**

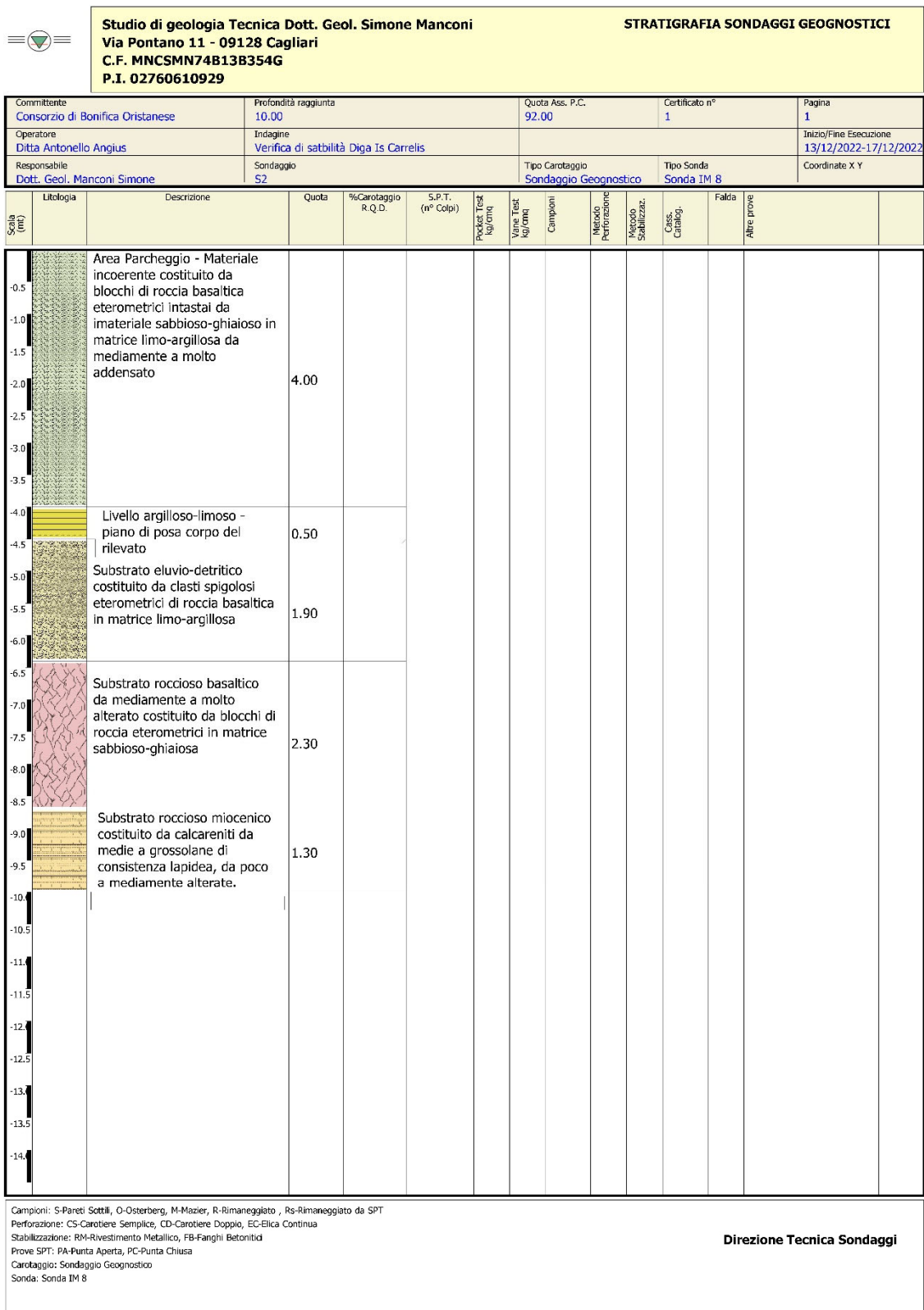


Fig.53: Colonna stratigrafica sondaggio geognostico S2



Fig.54: Cassetta catalogatrice sondaggio S2 (0.00 m – 5.00 m)



Fig.55: Cassetta catalogatrice sondaggio S2 (5.00 m – 10.00 m)

Complessivamente, per quanto è stato rilevato durante le indagini dirette, il corpo diga è costituito da un rilevato in materiale incoerente costituito da massi e blocchi di roccia basaltica intasati da sabbie limose in matrice argillosa, avente uno spessore complessivo di circa 9.30 metri nel punto centrale con livelli marcatamente più plastici e saturi alle quote di – 9.30 – 10.30 dalla quota del coronamento.

8. 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 Mogoro 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.

In particolare, sulla base degli ultimi aggiornamenti del PAI, si rileva che l'area d'intervento ricade in zona a pericolosità elevata da frana (Hg3). In particolare, queste condizioni di pericolosità sono state definite nell'ambito dell'aggiornamento del PUC in adeguamento al PAI ed al PPR.

Come meglio evidenziato dallo stralcio cartografico, le zone a pericolosità elevata da frana fanno riferimento alle cornici vulcaniche basaltiche sistemate a contorno della diga, le quali tuttavia allo stato attuale non si presentano con una condizione di franosità incipiente, come meglio evidenziato dall'analisi morfologica e aerofotogrammetrica eseguita mediante drone APR.

Trattandosi di una verifica geologica e geotecnica dello sbarramento, non sussiste la necessità di predisporre uno studio di compatibilità geologica e geotecnica secondo quanto disciplinato dalle N.A. del PAI.



Fig.56: Stralcio delle aree a pericolosità da frana – Comune di Mogoro



Fig.57: Stralcio delle aree a pericolosità idraulica– Comune di Mogoro

Per quanto meglio sopra riportato, trattandosi di un intervento di adeguamento per la sicurezza di esercizio richiesti da norme regionali e nazionali, si rileva che l'intervento è da ritenersi ammissibile coerentemente a quanto disposto dall'Art. 31 comma 3 lettera d) per il quale non sussiste l'obbligo di predisposizione di uno studio di compatibilità geologica e geotecnica in quanto non espressamente richiesto.

9. 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.

10. 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 rettilineo, che segue direttrici di faglia.

L'unità idrogeologica delle alluvioni Plio-Quaternarie è caratterizzata da terreni con permeabilità per porosità ed 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 tre prove di permeabilità: una prova Lefranc (nel sondaggio S1) all'interno del corpo del rilevato ad una quota di -4.60 m ÷ -5.00 m dal coronamento con rabbocco del livello fino alla quota dell'argine e una prova Lugeon a carico variabile direttamente sulle tasche del substrato vulcanico (11.70-13.70) e nel substrato roccioso miocenico calcarenitico (13.30-15.70).

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

In merito alla definizione delle condizioni di permeabilità dell'ammasso roccioso che costituisce il piano di 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. 58: 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)

Sulla base della prova effettuata è stato possibile pertanto classificare la permeabilità all'interno dell'ammasso roccioso basaltico e dell'ammasso roccioso miocenico calcarenitico 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 della prima prova Leugeon risulta essere pari a $\cong 2.44 \cdot 10^{-6}$ m/sec, pertanto equivalente ad un indice di scarsa permeabilità, come riportato nella tabella sottostante.

La prova Leugeon eseguita sul substrato calcarenitico miocenico ha invece restituito un indice di permeabilità ancora più basso, pari a $3.99 \cdot 10^{-8}$ m/sec, tuttavia sempre entro il range della scarsa permeabilità, pertanto da giudicarsi idoneo per il tipo di opera ad esso collegata

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	$10^{-9} > K$

12. 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 ($K_h \cdot K_v$).

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.

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

Sulla base delle analisi effettuate, il coefficiente di permeabilità K risulta essere pari a $\cong 1.62 \cdot 10^{-3}$ m/sec, pertanto equivalente ad un indice di buona conducibilità idraulica, il che conferma la presenza di materiale incoerente costituito da sabbie debolmente limose con ghiaia, ciottoli e blocchi.

Pertanto, considerato il valore molto alto di conducibilità idraulica, si è resa necessaria la posa in opera di un rivestimento plastico in PVC protetto da specchiature in CLS nella parte del paramento di monte (con tro acqua) grazie al quale la diga si presenta senza fenomeni di filtrazione all'interno del corpo del rilevato arginale.

13. Considerazioni conclusive

Nell'ambito delle analisi e verifiche per la configurazione nello stato attuale e con riferimento alle NTC 2018 dell'opera denominata "Sbarramento Is Carrelis" in agro del Comune di Mogoro (OR), è stato conferito un incarico specialistico allo scrivente Dott. Geol. Simone Manconi, iscritto al n° 513 dell'Ordine dei Geologi della Sardegna.

L'incarico è stato affidato per lo sviluppo delle attività di verifica e analisi previste dalle NTC 2018 e s.m.i. ed in particolare:

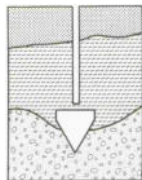
- Rilievo topografico dello stato di fatto;
- Restituzione della sezione trasversale dello sbarramento riportante tutte le misure caratteristiche tra cui: altezza dello sbarramento (def. Legge 584/94); quota di massima regolazione; quota di massimo invaso; quota del coronamento; scarico di fondo e relativa quota.
- Indagini geologico-geotecniche necessarie alla redazione delle verifiche statiche e relazioni di corredo;
- Implementazione del calcolo statico dello sbarramento ai sensi delle NTC 2018;
- Documentazione fotografica aggiornata dello sbarramento e delle opere accessorie attestante lo stato manutentivo dell'impianto

Dalle indagini fin qui svolte si certifica che lo sbarramento di Is Carrelis si trova in un eccellente stato di manutenzione, in particolare, il corpo del rilevato si trova con un buono stato di addensamento, non presenta vuoti e risulta privo di circolazione idrica superficiale e sotterranea.

Le caratteristiche del basamento roccioso su cui poggia il corpo del rilevato sono da ritenersi eccellenti in quanto costituite da una basamento calcarenitico con valori di permeabilità estremamente bassi.

Le prove di permeabilità svolte all'interno del corpo del rilevato hanno certificato la presenza di terreni incoerenti con valori di conducibilità idraulica molto elevati, ragion per cui l'intervento di impermeabilizzazione del paramento di monte con telo in PVC e contestuale protezione con specchiature in CLS è ancora oggi da ritenersi la migliore soluzione che conferma l'ottimo stato di manutenzione della diga, data l'assenza di fenomeni di circolazione idrica all'interno del corpo del rilevato come testimoniato dalle numerose indagini geoelettriche svolte.

Nel complesso, da un punto di vista geologico, geomorfologico e idrogeologico si ritiene che sussistano tutte le condizioni per una prosecuzione all'esercizio dello sbarramento.



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Comune di Mogoro

Provincia di Oristano

Progetto:

Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro



DICEMBRE 2022

INDAGINE GEOGNOSTICA

Committente: Dott. Geol. Simone Manconi

Sommario

Premessa	1
1.0 Inquadramento geografico e topografico del sito	2
2.0 Caratteristiche della campagna geognostica	4
3.0 Sondaggi geognostici	5
3.1 Prove SPT (Standard Penetration Test)	6
4.0 Prove Lefranc a carico costante	9
5.0 Prove Lugeon	10

Allegati

ALLEGATO 1 – Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 2 – Report fotografico

ALLEGATO 3 – Prove Lefranc

ALLEGATO 4 – Prove Lugeon

PREMESSA

Nel mese di Dicembre 2022 il Dott. Geol. Simone Manconi, nell'ambito delle indagini a supporto del progetto in sanatoria del Consorzio di Bonifica dell'Oristanese per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato in Località Is Carrelis nel Comune di Mogoro, ha affidato all'impresa specializzata *DR. ANTONELLO ANGIUS* una campagna di indagini geognostiche e geotecniche al fine di parametrizzare i terreni di sedime dal punto di vista idrogeologico e geotecnico.

L'indagine è stata articolata nell'esecuzione 2 sondaggi a carotaggio continuo con contestuale esecuzione di una prova penetrometrica SPT (Standard Penetration Test), una prova di tipo Lefranc e una due prove di tipo Lugeon.

Le prove in sito sono state eseguite nei giorni dal 9 al 13 Dicembre 2022.

La presente relazione illustra la modalità di esecuzione degli interventi in situ. Le operazioni di indagine rispondono alla normativa tecnica ufficialmente riconosciuta e, in particolare, fanno riferimento alle seguenti normative e specifiche di riferimento:

- Raccomandazioni A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana);
- Normativa A.N.I.S.I.G. (Associazione Nazionale delle Imprese Specializzate nelle Indagini Geognostiche).

Tutti i lavori sono stati eseguiti dal personale specializzato dell'Impresa ed assistiti in cantiere da Geologi esperti in geognostica e indagini in sito.

1.0 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TOPOGRAFICO DEL SITO

L'area oggetto d'indagine ricade nel Comune di Mogoro (OR) (**Figura 1**), i riferimenti cartografici sono rappresentati da:

- ➔ Foglio 539 sez. III “Mogoro” dell'IGM (scala 1: 25.000) (**Figura 2**);
- ➔ Sez. 539-100 “Mogoro” della Nuova Carta Tecnica Regionale (scala 1:10.000) (**Figura 3**).

L'immagine **Figura 4** riporta una panoramica dei luoghi d'intervento su ortofoto satellitare (Google Earth).

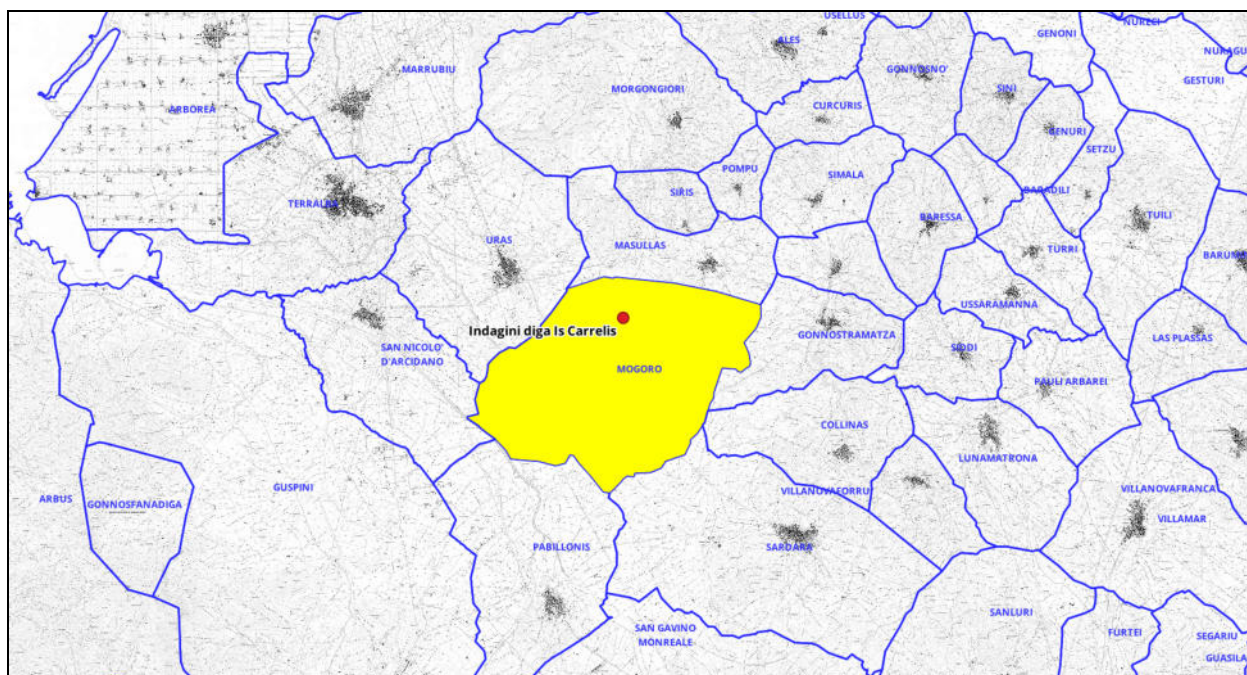


Figura 1 - Inquadramento geografico del sito

“Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro”

Relazione indagine geognostica

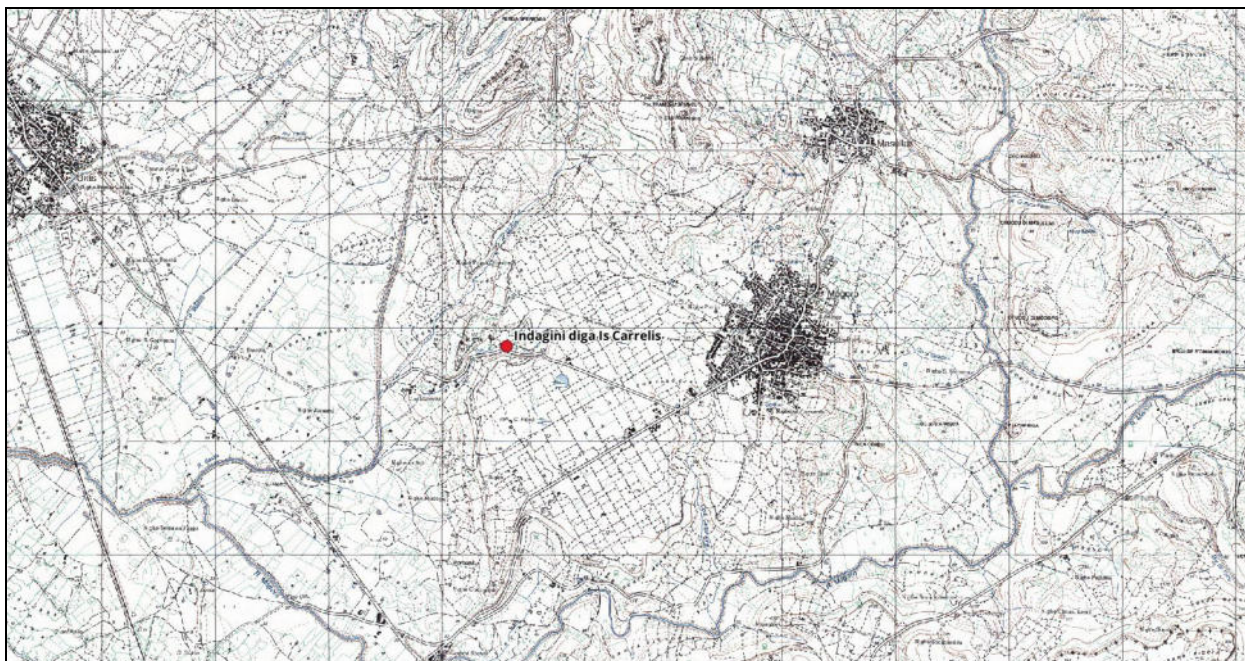


Figura 2 - Stralcio Cartografia I.G.M. – Foglio 539 sez. III

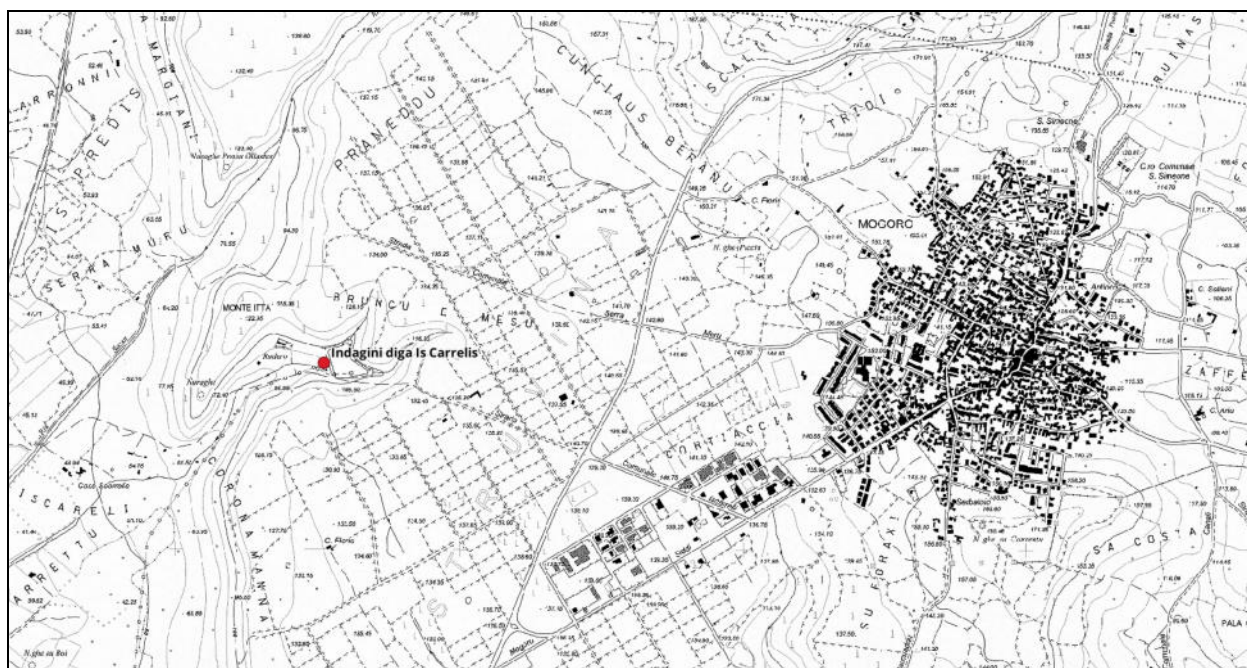


Figura 3 - Stralcio Carta C.T.R. – Sez. 539-100



Figura 4 - Panoramica dei luoghi d'intervento

2.0 CARATTERISTICHE DELLA CAMPAGNA GEOGNOSTICA

L'indagine è stata articolata come segue:

- esecuzione di n. 2 sondaggi a rotazione a carotaggio continuo ($\varnothing$ 101 mm), spinti a profondità massima di 15.70 m dal p.c.;
- esecuzione di una prova penetrometrica SPT;
- esecuzione di una prova Lefranc e di n. 2 prove Lugeon.

3.0 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Sono stati eseguiti 2 sondaggi a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, spinti a profondità comprese tra 10.00 e 15.70 metri dal p.c. Per la realizzazione del carotaggio continuo sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata Deltabase 520;
- Carotiere semplice con corone *widia* Ø 101 mm
- Carotiere doppio T6 con corona diamantata;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC.

La tabella sottostante riporta l'identificativo del sondaggio e la profondità raggiunta (**Tab.1**).

ID Sondaggio	Profondità (m)
S1	15.70
S2	10.00

Tab. 1 - Sondaggi e profondità raggiunte

Per l'avanzamento della perforazione, nei livelli non lapidei, sono stati utilizzati carotieri semplici, costituiti da un tubo metallico cilindrico avente diametro di 101 mm e lunghezza pari a 1.50 m, munito all'estremità inferiore di una corona in Carburo di Tungsteno (*widia*) e provvisto, nella parte sommitale, di un dispositivo (valvola di ritenzione) che impedisce la perdita dei campioni di terreno prelevati. Nei livelli lapidei è stato utilizzato il carotiere doppio T6 con corona diamantata.

Le carote estratte durante le perforazioni sono state riposte in cassette monostampo in PVC, dotate di coperchio, per lunghezze di 5 ml cadauna, opportunamente siglate e fotografate.

L'ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti è riportata nell'**Allegato 1 - Planimetria ubicazione indagini**.

L'**Allegato 2 – Report fotografico** riporta le foto delle cassette catalogatrici e dei posizionamenti.

Le stratigrafie dei sondaggi saranno redatte a cura della Direzione Lavori, Dott. Geol. Simone Manconi.

3.1 PROVE SPT (STANDARD PENETRATION TEST)

Durante il corso dei sondaggi è stata eseguita una prova SPT.

Questa prova consiste nell'infissione a percussione di una speciale punta conica o di un particolare campionatore a pareti grosse (Campionatore Raymond – split spoon), i quali consentono di valutare la resistenza meccanica del terreno alla penetrazione, in base al numero di colpi infissi da un apposito maglio per un dato avanzamento.

La normativa di riferimento per l'esecuzione di prove S.P.T. è la seguente:

- A.G.I. - Associazione Geotecnica Italiana (1977). Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche;
- ASTM D1586-67 (74); D1586-84. Standard Method for Penetration Test and Split-Barrel Sampling of Soil";
- ISSMFE Techn. Committee (1988). Standard Penetration Test (SPT): International Reference Test procedure.

Le dimensioni del campionatore, il peso delle aste e del maglio, l'altezza di caduta dello stesso, vengono indicati nella normativa sopra citata.

Tali dati sono riassunti in:

- *Tubo campionatore apribile longitudinalmente*: $\varnothing$ est= 50.8 mm; $\varnothing$ int= 35 mm; L minima (escluso tagliente principale)>457 mm; L utile = 630 mm; L scarpa tagliente terminale (con rastremazione negli ultimi 19 mm) = 76 mm; il campionatore è munito di valvola a sfera alla sommità e aperture di scarico e sfiato;
- *Punta Conica*: apertura della punta conica 60° e diametro esterno 50.8 mm;

- *Massa battente*: di peso 63,4 kg che cada da 75 cm di altezza con dispositivo di sgancio automatico;
- *Aste collegate al campionatore*: aventi peso per metro lineare 6.5 kg (± 0.5 kg/ml). Le aste saranno dritte, ben avvitate in corrispondenza dei giunti e con flessione totale della batteria pronta per la prova $< 1^\circ$.

La caduta del maglio deve essere libera; pertanto, deve essere adottato un dispositivo di sganciamento automatico che svincoli il maglio dal cavo, o altro dispositivo di sollevamento, all'altezza voluta.

Fra la testa di battuta in sommità delle aste ed il piano campagna deve essere installato almeno un centratore di guida ed irrigidimento delle aste stesse.

La differenza fra il diametro esterno delle aste e diametro interno della tubazione metallica provvisoria di rivestimento non deve superare di norma i 6 cm.

Qualora ciò avvenga devono essere predisposte, lungo la batteria delle aste ad intervalli di 3 m, opportune alette di irrigidimento, di dimensioni adeguate al diametro interno effettivo della tubazione di rivestimento provvisoria.

Metodologia di prova

La prova consiste nell'infiiggere nel terreno alla base del sondaggio il campionatore, per 3 tratti consecutivi, ciascuno di 15 cm, rilevando il numero di colpi (N) necessario per la penetrazione di ciascun tratto di 15 cm. Il valore di N_{spt} è dato dalla somma dei colpi ottenuti per il 2° e 3° tratto.

La prova viene sospesa quando il numero dei colpi N, per un tratto di 15 cm, supera 50. In tal caso si annota la penetrazione (in cm) ottenuta con 50 colpi: tale valore rappresenta il "Rifiuto".

Le fasi da seguire sono le seguenti:

- prima di eseguire la prova è necessario controllare con scandaglio la quota del fondo del foro, confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione o di pulizia

precedentemente eseguita. Può risultare dal controllo che la quota misurata sia più alta per effetto di reflussi del fondo del foro o per decantazione di detriti in sospensione del fluido. Se tale differenza supera 7 cm la prova non può essere eseguita; si deve pertanto procedere ad un'ulteriore manovra di pulizia;

- calare a fondo del foro la batteria di prova. La quota di inizio della prova S.P.T. deve corrispondere a quella misurata mediante il controllo di cui sopra che, come detto, può coincidere con quella di perforazione o pulizia ma può anche essere (fino a 7 cm) superiore. L'eventuale affondamento del campionatore, per peso proprio e delle aste, deve essere annotato ma è già parte integrante dei 45 cm complessivi di infissione;

- procedere all'infissione contando ed annotando il numero dei colpi del maglio, fino ad un massimo di 50 colpi per ogni tratto di 15 cm. Il ritmo di percussione deve essere compreso tra i 10 ed i 30 colpi al minuto;

- ad estrazione avvenuta il campione prelevato viene misurato, descritto, trascurando l'eventuale parte alta costituita da detriti, sigillato in adatto contenitore ed inviato al laboratorio;

- in presenza di materiali molto compatti o ghiaie grossolane si adotterà la particolare punta conica.

La tabella seguente (**Tab.2**) riporta i dati delle prove eseguite e le relative profondità.

ID Sondaggio	Profondità della prova (m)	Valori SPT (N1-N2-N3)	N _{SPT} (N2+N3)
S1	6.00	12-15-19	34

Tab. 2 - Prove SPT e relativi valori

4.0 PROVE LEFRANC A CARICO COSTANTE

Nel corso del sondaggio S1 è stata eseguita una prova di permeabilità Lefranc a carico costante, eseguita in corrispondenza della quota stabilita dalla D.L.

La prova è destinata a misurare la conducibilità idrica del terreno. Si esegue misurando gli assorbimenti di acqua, facendo filtrare quest'ultima attraverso un tratto di foro predeterminato. È una prova di permeabilità da eseguirsi in fase di avanzamento della perforazione in terreni non rocciosi, sotto falda o fuori falda, in quest'ultimo caso dopo avere saturato con acqua il terreno.

Per l'esecuzione della prova è necessario che le pareti del foro siano rivestite con tubo di rivestimento per tutto il tratto non interessato alla prova.

Nel caso di terreni a conducibilità non elevata si esegue a carico idraulico variabile; a carico idraulico costante nel caso di una elevata conducibilità.

La tabella seguente (**Tab.3**) riporta i dati della prova eseguita.

ID prova	ID Sondaggio	Tratto di prova (m)	Descrizione litologica	K (m/s)
Prova Lefranc 1	S1	0.00 – 5.00	Sabbia debolmente limosa con ghiaia, ciottoli e blocchi	$1.62 \cdot 10^{-3}$

Tab. 3 Prova di permeabilità Lefranc

Per l'esecuzione e l'elaborazione delle prove è stata adottata la normativa A.G.I.

Si è proceduto secondo il seguente schema:

- perforazione con carotiere fino al tetto del tratto di prova;
- rivestimento del foro con infissione a secco negli ultimi 20-30 cm, per bloccare l'eventuale fuga dell'acqua;
- esecuzione a carotaggio della “tasca di prova”;
- esecuzione della prova.

La modalità esecutiva della prova è stata la seguente:

- riempimento con acqua fino all'estremità del rivestimento ed attesa della saturazione.
- controllo della portata immessa a regime idraulico costante che sarà determinato con contalitri; le condizioni di immissione a regime costante devono essere mantenute, senza variazione alcuna, per almeno 10-20';
- a partire dal momento dell'interruzione della prova, si misureranno gli abbassamenti progressivi del livello dell'acqua a distanza di 2', 4', 6', 8', 10', proseguendo fino all'esaurimento dell'abbassamento o al raggiungimento del livello della falda..

Per la determinazione del coefficiente di permeabilità K (m/s) è stata utilizzata la seguente formula:

$$K = \frac{Q}{F \cdot h}$$

Nella quale:

Q = portata immessa o emunta (m^3/sec)

F = fattore di forma che dipende dalla geometria della prova (m)

h = differenza di altezza del livello dell'acqua provocato dall'immissione o dall'emungimento (m)

L' **Allegato 3 – Prove Lefranc** illustra i dati sintetici raccolti durante la prova.

5.0 PROVE LUGEON

In fase di avanzamento della perforazione del sondaggio S1 sono state eseguite n. 2 prove di permeabilità Lugeon, eseguite in corrispondenza della quota stabilita dalla D.L.

La prova di permeabilità Lugeon misura l'attitudine di un ammasso roccioso ad essere interessato da circolazione idrica, permettendo di determinarne la permeabilità o la fratturazione.

Tali prove vengono effettuate immettendo acqua in pressione entro un tratto isolato di foro di sondaggio, perforato in terreni lapidei o litoidi, misurando i volumi assorbiti a diverse pressioni, per valutare la permeabilità di ammassi rocciosi in termini di assorbimento di acqua nell'unità di tempo, in funzione della pressione di prova e della lunghezza del tratto di foro interessato.

Il tratto di foro isolato viene realizzato mediante tubo adduttore munito di otturatore ad espansione (packer) singolo o doppio. La prova può essere effettuata in fase avanzamento della perforazione, utilizzando un solo packer, oppure a foro completo per mezzo di una coppia di packer. Il packer viene espanso mediante azoto o aria, isolando la camera di prova.

Per l'esecuzione della prova il foro deve essere privo di rivestimento e il fluido di perforazione sarà costituito da sola acqua priva di additivi.

La tabella seguente (**Tab.4**) riporta l'identificativo della prova, il sondaggio nella quale è stata eseguita e la profondità della camera di prova.

ID prova	ID sondaggio	Tratto di prova (m)	Profondità della falda (m dal p.c.)
Prova Lugeon 1	S1	11.70 – 13.70	1.80
Prova Lugeon 2	S1	13.30 – 15.70	7.90

Tab.4 Prove Lugeon

ATTREZZATURA IMPIEGATA

L'esecuzione della prova richiede l'attrezzatura elencata di seguito:

- otturatore singolo (packer) GEOPACK della Italswiss, $\varnothing 74$ e lunghezza 1.00 m; il tubo di collegamento dei due pistoncini espandibili avrà una superficie forata $A_f \geq 2 A_t$, essendo A_t la superficie della sezione cava del tubo;

- pompa Bellin mod. NG530 L/P accoppiata a motore idraulico, in grado di raggiungere pressioni di iniezione di 24 Bar e portata di 9 m³/h = 150 l/min;
- contalitri per la misura delle portate immesse, inserito nel circuito di mandata, con sensibilità di 0,1 litri;
- manometro per la misura della pressione di iniezione, con sensibilità di 0,5 atm e certificato di taratura non anteriore a 3 mesi;
- tubi di adduzione di tipo idraulico.

MODALITÀ ESECUTIVE: PROVA IN AVANZAMENTO CON PACKER SINGOLO

L'esecuzione di queste prove è stata effettuata durante l'avanzamento della perforazione, utilizzando un solo packer che viene calato nel foro dopo avere misurato il livello piezometrico nel sondaggio.

Il packer sarà espanso fino ad isolare il tratto finale del foro per una lunghezza massima di 5 metri. Allo scopo di una buona tenuta del packer è sufficiente che la pressione di gonfiaggio sia superiore di 2.0-3.0 Bar a quella di iniezione dell'acqua. La lunghezza della membrana del packer che aderisce alla parete del foro per sigillarla deve essere sufficiente a garantire che non si abbiano perdite attraverso le fratture passanti.

Dopo aver monitorato gli assorbimenti dovuti al solo carico idraulico dovuto alla falda, si procede ad iniettare acqua nel tratto di prova, eseguendo 3 (o più) diversi gradini di pressione in salita e ripetendo alcuni gradini in discesa, misurando per ciascun gradino le portate assorbite ogni 2 minuti per intervalli complessivi di 10 min/gradino.

La scelta del valore dei gradini di pressione dipende dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso, dagli specifici obiettivi progettuali delle prove e dalle condizioni di assorbimento registrate durante la prova.

Non si supereranno comunque valori massimi di 10 Bar, e solo nei casi di elevata resistenza meccanica della matrice rocciosa. In condizioni diverse è preferibile non superare pressioni di 3 Bar in rocce poco resistenti e di 5 Bar in rocce mediamente resistenti.

La tabella alla pagina seguente propone alcuni riferimenti in merito.

Condizioni di prova	Gradini di pressione (Bar)
Rocce semilitoidi, litoidi o litiche a scarsa resistenza, a profondità inferiore a 5 m dal p.c.	0.5 – 1.5 – 2.5 – 1.5 – 0.5
Rocce a scarsa resistenza	1.0 – 2.0 – 3.0 – 2.0 – 1.0
Rocce a media resistenza	1.0 – 3.0 – 5.0 – 3.0 – 1.0
Rocce ad alta resistenza	2.0 – 4.0 – 8.0 – 4.0 – 2.0

Gradini di pressione in funzione delle condizioni di prova

La **Figura 5** mostra lo schema illustrativo della prova Lugeon.

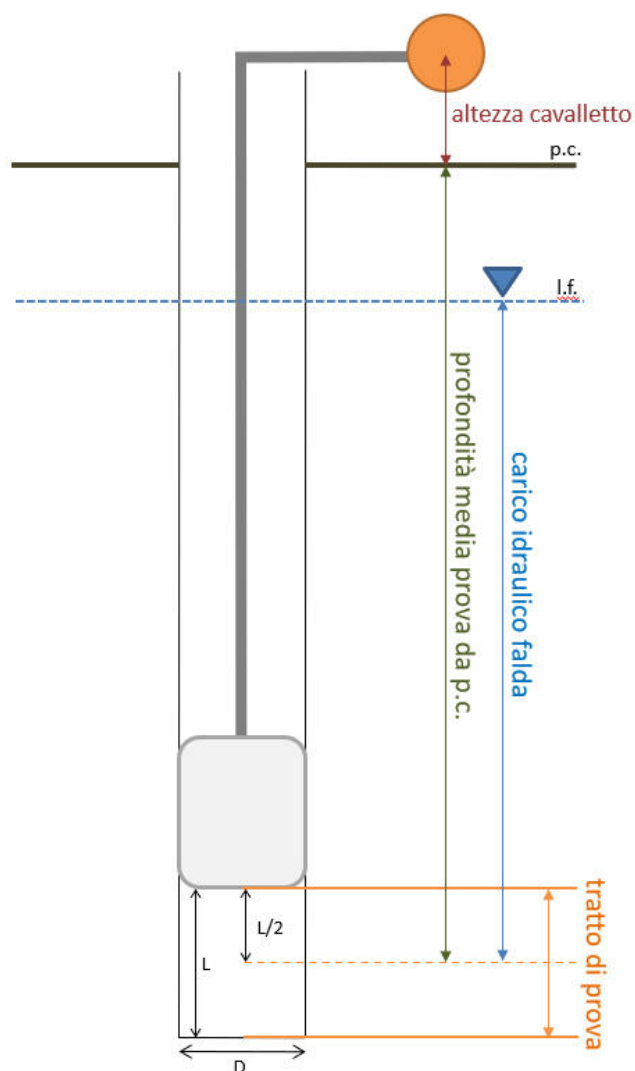


Figura 5. Schema della prova Lugeon

Durante l'esecuzione della prova si devono registrare per ogni gradino di pressione:

- il tempo e gli assorbimenti per arrivare a regime;
- il tempo e gli assorbimenti con portata a regime per letture effettuate ogni 2 minuti.

ELABORAZIONE DEI DATI

L'elaborazione ed interpretazione è eseguita attraverso il metodo di Houlby (1976): per ogni gradino di pressione è calcolato il relativo valore di Unità Lugeon secondo la formula:

$$\text{Unità Lugeon} = \frac{\text{assorbimento in } \frac{l}{min}}{\text{pressione utilizzata durante la prova in } \frac{kg}{cm^2}} * 10 \frac{kg}{cm^2}$$

I valori di Unità Lugeon ottenuti sono quindi esaminati e confrontati e conseguentemente viene scelto il valore che si ritiene rappresentativo dell'intera prova. La **Figura 6** mostra i criteri in base ai quali viene scelto il valore di Unità Lugeon rappresentativo della prova.

Sulla base dei valori di permeabilità, in Unità Lugeon, misurati per i cinque gradini di pressione, si possono avere 5 differenti condizioni di moto idraulico: flusso laminare, flusso turbolento, dilatazione, dilavamento e riempimento.

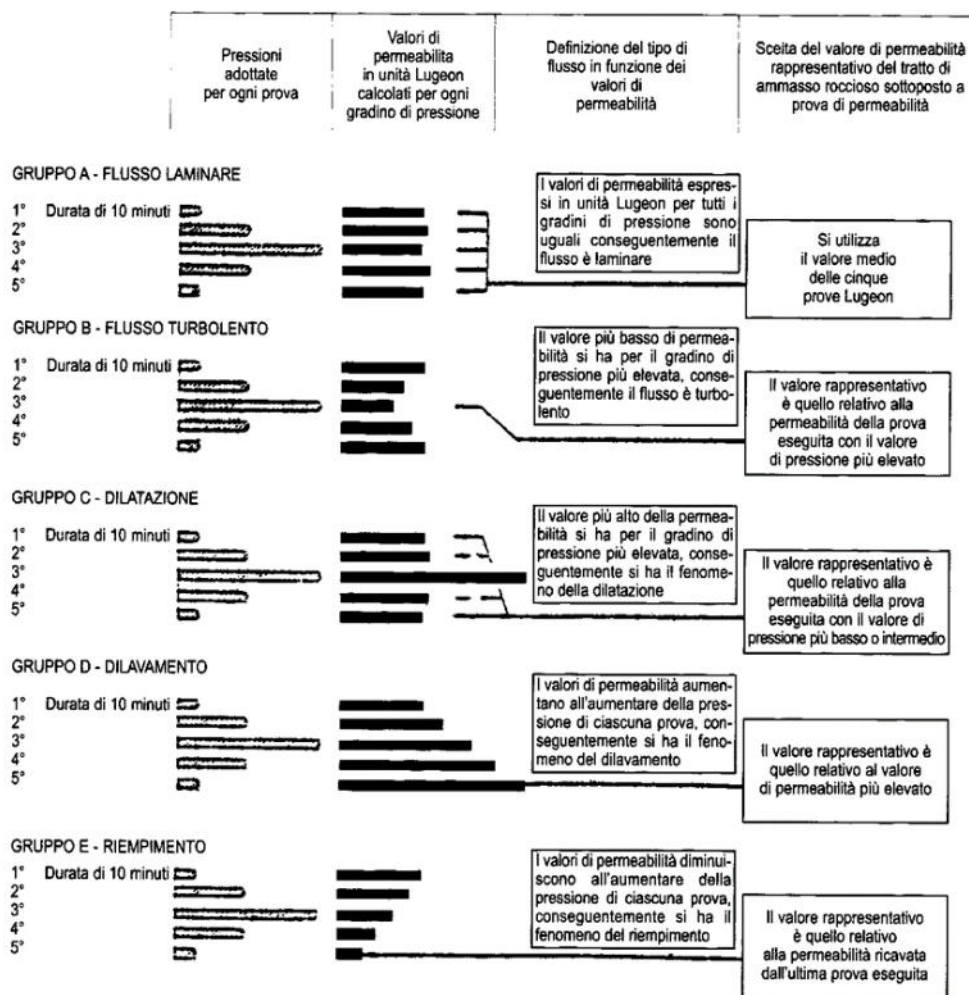


Figura 6. Interpretazione delle prove Lugeon (Houlsby, 1977)

Dalle prove Lugeon può essere ricavato il valore del coefficiente di permeabilità K (m/s) mediante la seguente formula (AGI, 1975):

$$k = \frac{q}{P_e} \cdot \frac{\gamma_w}{C}$$

dove:

q = portata assorbita (l/min);

P_e = pressione effettiva nella cavità, tenendo conto cioè delle pressioni lette al manometro, dell'altezza della colonna d'acqua, delle perdite di carico nelle tubazioni e della eventuale presenza della falda;

$$c = 2 * \pi * D * \frac{\sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}}{\ln\left[\left(\frac{L}{D}\right) + \sqrt{\left(\frac{L}{D}\right)^2 - 1}\right]}$$

dove

D = diametro della perforazione;

L = lunghezza del tratto di prova;

γ_w = peso specifico dell'acqua.

La tabella seguente (**Tab.5**) riporta i valori medi di permeabilità media e Unità Lugeon media ottenuti per ciascuna delle prove eseguite.

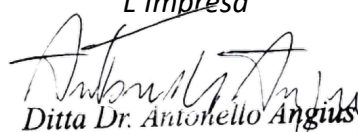
ID prova	Permeabilità K (m/s)	Unità Lugeon
Prova Lugeon 1	$2.44 \cdot 10^{-6}$	25.1
Prova Lugeon 2	$3.99 \cdot 10^{-8}$	0.39

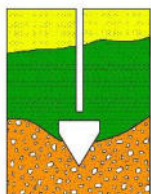
Tab.5 Valori di permeabilità

L' **Allegato 4 – Prove Lugeon** illustra i dati sintetici raccolti durante le singole prove.

Cagliari, 05.01.2023

L'Impresa


Ditta Dr. Antonello Angius
Via Italia, 143 - 09134 Cagliari
C.F. NGSNNL61H07B354Y
P. Iva 01985230927



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro

Committente:

Dott. Geol. Simone Manconi

Planimetria ubicazione indagini

ALLEGATO 1

TAVOLA 1

PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI

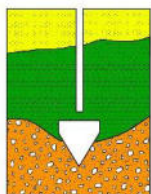
Comune di Mogoro

Progetto: *Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro*

LEGENDA

● Sondaggi geognostici





DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro

Committente:

Dott. Geol. Simone Manconi

Report fotografico

ALLEGATO 2



Posizionamento sondaggio S1



Sondaggio S1, 0.00 – 5.00 m



Sondaggio S1, 5.00 – 10.00 m



Sondaggio S1, 10.00 – 15.70 m



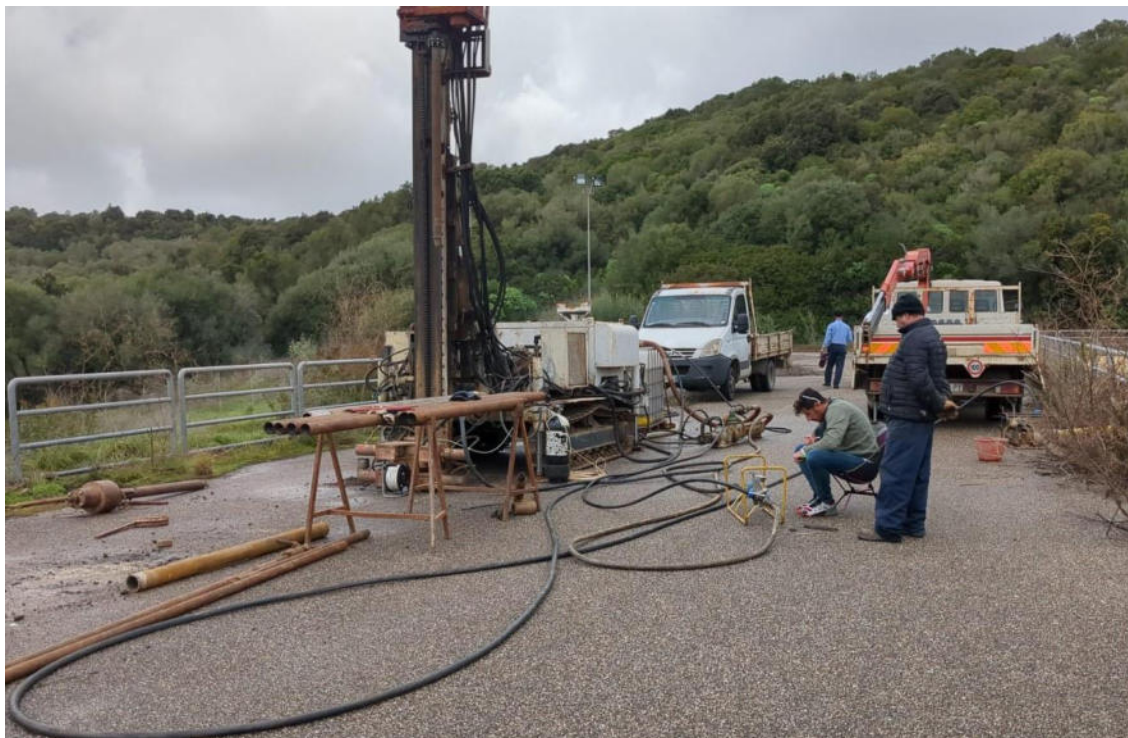
Posizionamento sondaggio S2



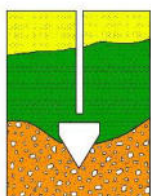
Sondaggio S2, 0.00 – 6.80 m



Esecuzione della Prova Lugeon 1 – Sondaggio S1



Esecuzione della Prova Lugeon 2 – Sondaggio S1



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

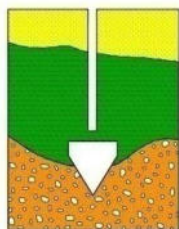
Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro

Committente:

Dott. Geol. Simone Manconi

Prove Lefranc

ALLEGATO 3



Ditta Dr. Antonello Angius

Indagini geognostiche, monitoraggio ambientale

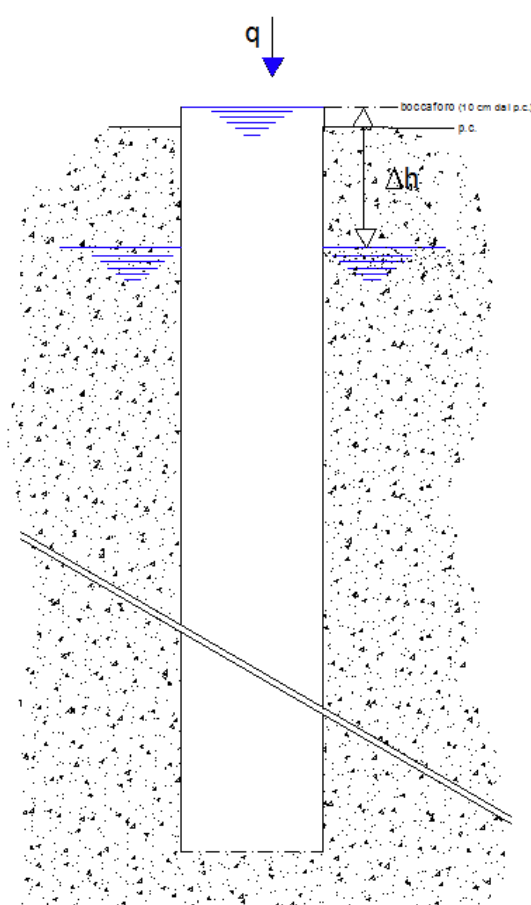
Via Italia, 143 – 09134 Cagliari

Committente: Dott. Geol. Simone Manconi – CBO
 Cantiere: Mogoro – Diga Is Carrelis
 Tratto di prova: 0,00 – 5,00m
 Diametro foro: 101 mm

Data: 09/12/2022
 Sondaggio: S1
 Quota falda: falda assente

Prova di permeabilità di immissione a carico costante

SCHEMA GEOMETRICO



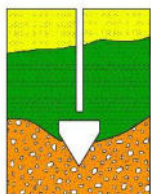
Formula di riferimento

$$K = \frac{q}{C \times \Delta h}$$

in cui:

q = portata immessa (mc/sec)
 Δh = innalzamento piezom. (m)
 C = coefficiente di forma

Litri immessi	Tempo	Portata a regime		Carico idraulico a regime	Diametro del foro	Coeff. di forma	Coeff. di permeabilità
		q (l/sec)	q (m3/sec)				
36.0	15	2.30	0.02	5.00	0,101	2.85	1.61E-03
69.0	30	2.30	0.02	5.00	0,101	2.85	1.61E-03
134.0	60	2.25	0.02	5.00	0,101	2.85	1.58E-03
288.0	120	2.40	0.02	5.00	0,101	2.85	1.68E-03



DR. ANTONELLO ANGIUS

Web site: www.angiusgeo.com

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI
GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: angiusgeo@pec.it

e-mail: angiusgeo@tiscali.it

Progetto:

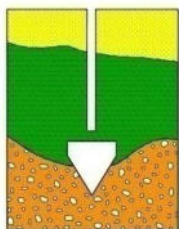
Indagine geognostica e geotecnica a supporto del progetto in sanatoria per la prosecuzione all'esercizio di un invaso situato nel Comune di Mogoro

Committente:

Dott. Geol. Simone Manconi

Prove Lugeon

ALLEGATO 4



Ditta Dr. Antonello Angius

Indagini geognostiche, monitoraggio ambientale

Via Italia, 143 – 09134 Cagliari

Committente: Dott. Geol. Simone Manconi – CBO

Cantiere: Mogoro – Diga Is Carrelis

Tratto di prova: 11,70 – 13,70m

Diametro foro: 101 mm

Data: 09/12/2022

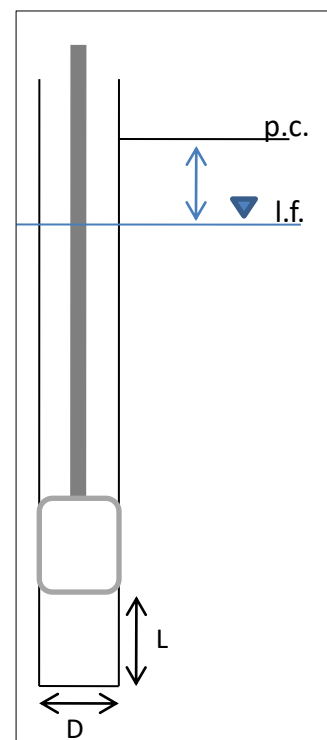
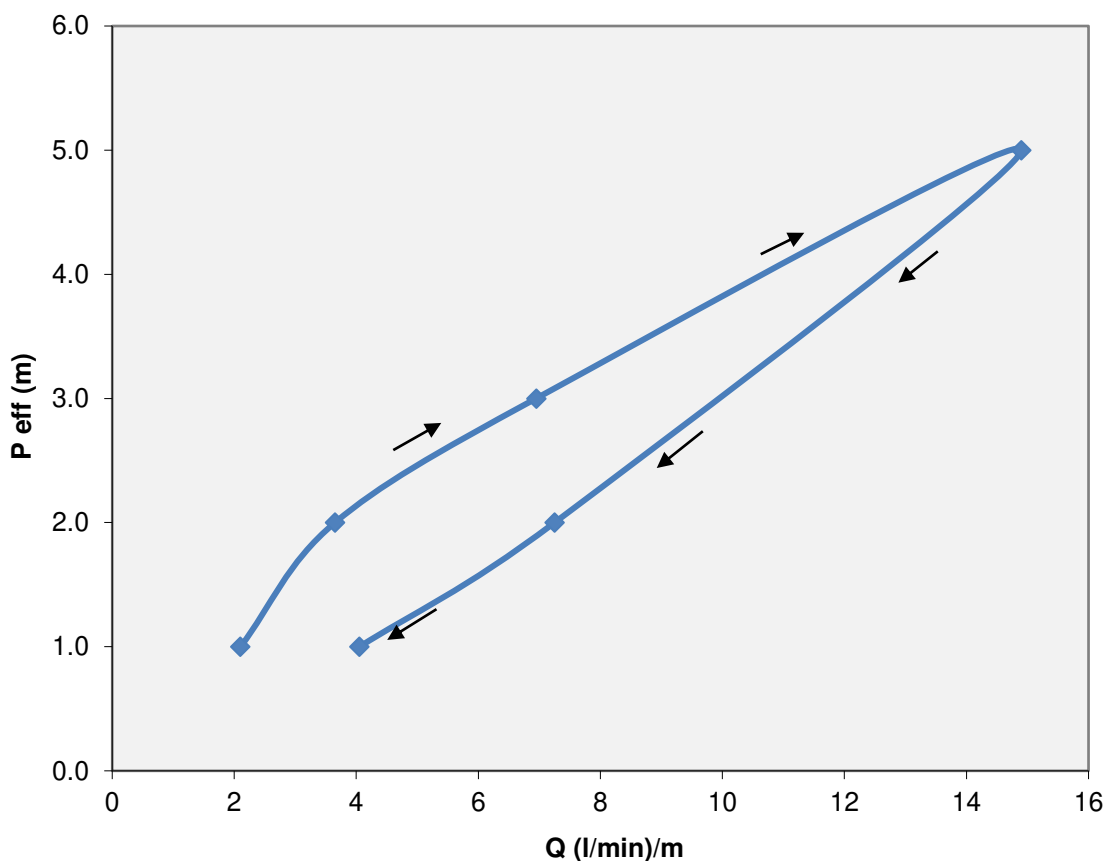
Sondaggio: S1

RQD: 0-2 %

Quota falda: -1,80 m dal p.c.

Prova di permeabilità Lugeon

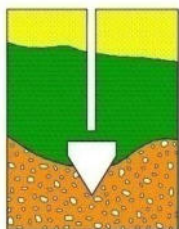
P man	P eff	Ass x 10'	Portata	Portata	K	Unità Lugeon
(bar)	(m)	(litri)	(l/min)/m	(mc/sec)	(m/sec)	/
1.0	12.1	42	2.1	7.00E-05	1.69E-06	17.4
2.0	22.1	73	3.65	1.22E-04	1.61E-06	16.5
3.0	32.1	139	6.95	2.32E-04	2.11E-06	21.7
5.0	52.1	298	14.9	4.97E-04	2.79E-06	28.6
2.0	22.1	145	7.25	2.42E-04	3.20E-06	32.8
1.0	12.1	81	4.05	1.35E-04	3.26E-06	33.5



Attrezzature

-Pompa Centrifuga Bellin 600

-Packer singolo L= 1,5 D= 76 mm



Ditta Dr. Antonello Angius

Indagini geognostiche, monitoraggio ambientale

Via Italia, 143 – 09134 Cagliari

Committente: Dott. Geol. Simone Manconi – CBO

Cantiere: Mogoro – Diga Is Carrelis

Tratto di prova: 13,30 – 15,70m

Diametro foro: 101 mm

Data: 13/12/2022

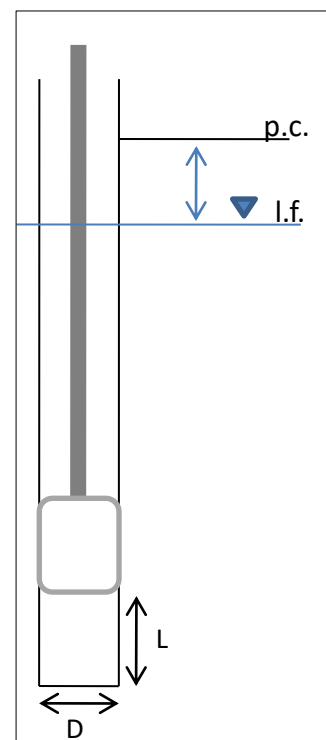
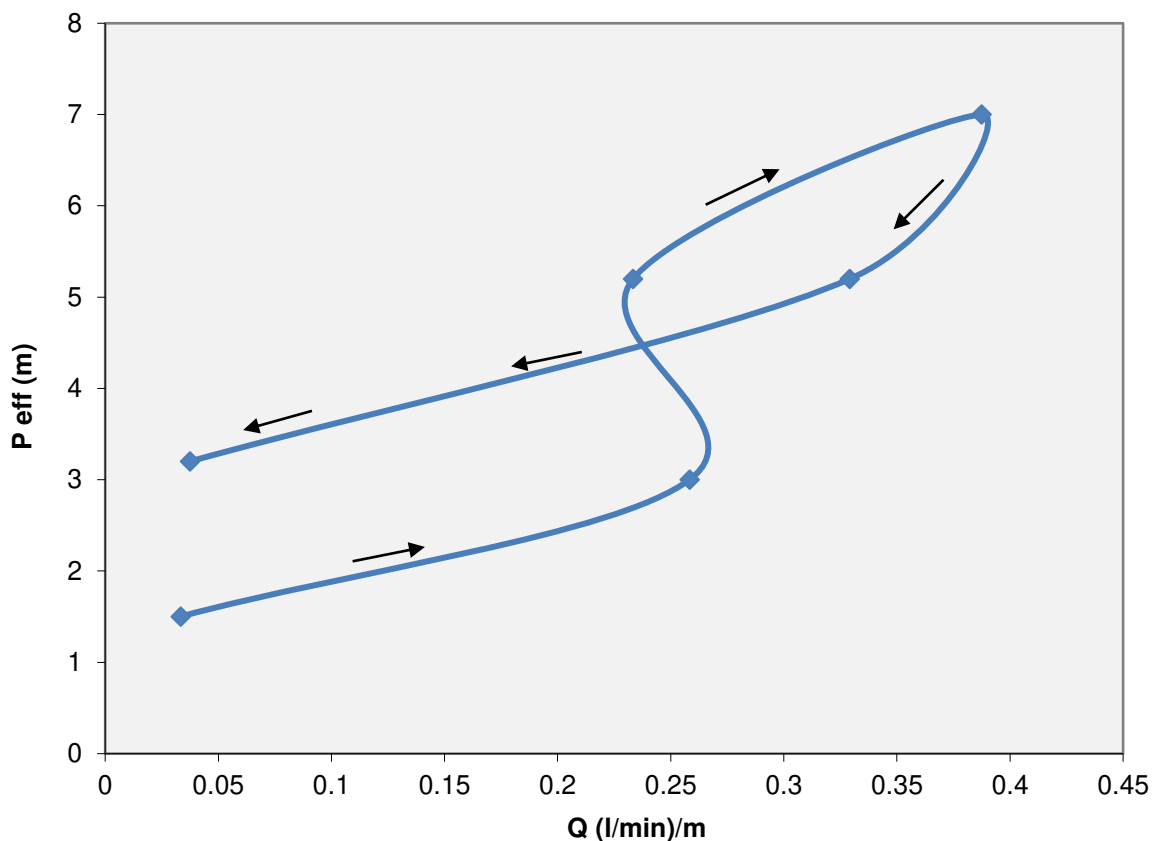
Sondaggio: S1

RQD: 0-2 %

Quota falda: -7,90 m dal p.c.

Prova di permeabilità Lugeon

P man	P eff	Ass x 10'	Portata	Portata	K	Unità Lugeon
(bar)	(m)	(litri)	(l/min)/m	(mc/sec)	(m/sec)	/
1.5	23.2	0.8	0.033333333	1.3E-06	1.47E-08	0.14
3	38.2	6.2	0.258333333	1.0E-05	6.91E-08	0.68
5.2	60.2	5.6	0.233333333	9.3E-06	3.96E-08	0.39
7	78.2	9.3	0.3875	1.6E-05	5.07E-08	0.50
5.2	60.2	7.9	0.329166667	1.3E-05	5.59E-08	0.55
3.2	40.2	0.9	0.0375	1.5E-06	9.54E-09	0.09



Attrezzature

-Pompa Centrifuga Bellin 600

-Packer singolo L= 1,5 D= 76 mm

COMUNE DI MOGORO
Provincia di Oristano

VERIFICA DELLO SBARRAMENTO IS CARRELIS
SITUATO NEL COMUNE DI MOGORO (OR) IN
CONFORMITÀ ALLE PRESCRIZIONI DELLA L.R. 12/2007



Studio di Geologia Tecnica e Ambientale

Dott. Geol. Giancarlo Carboni

Via Nazionale 277

09039 Villacidro (SU)

cell. 329 4177709

e-mail: info@geosardegna.it

www.geosardegna.it

OGGETTO:

Indagini geofisiche mediante la metodologia della tomografia geoelettrica e sismica con metodologia MASW e tomografia sismica a rifrazione eseguite nel corpo della diga Is Carrelis in agro di Mogoro (OR).

Il tecnico incaricato

Dott. Geol. Giancarlo CARBONI

Ordine dei Geologi della Sardegna n° 497

Il committente:

Dott. Geol. Simone Manconi

INDICE

Premessa.....	1
Generalità sull'Indagine Geofisica.....	2
Prospezione geoelettrica	3
Resistività apparente.....	4
Dispositivi elettrodi.....	5
Dispositivi elettrodi dipolari	5
Dispositivi elettrodi quadripolari	7
Modelli di resistività 2D.....	8
Strumentazione tomografia geoelettrica utilizzata.....	8
Operazioni di campagna.....	11
Rappresentazione delle pseudosezioni.....	11
Esecuzione dell'indagine geoelettrica	12
Sezioni di resistività.....	13
Descrizione delle sezioni di resistività delle indagini geoelettriche	15
Misure di polarizzazione indotta.....	15
Sezioni di polarizzazione indotta.....	18
Descrizione delle sezioni di caricabilità delle indagini geoelettriche	18
Prospezione sismica a rifrazione	20
Strumentazione utilizzata.....	20
Descrizione della metodologia	21
Tipiche velocità delle Vp in funzione del litotipo	22
Confronto shot break primi arrivi e dromocrone.....	22
Rappresentazione dei risultati	23
Analisi delle sezioni sismiche a rifrazione	23
Sezione sismica a rifrazione	24
INDAGINE SISMICA con onde di superficie MASW	25
Metodologia MASW	25
Fasi di elaborazione.....	26
Geometria dello stendimento sismico	27
Rigidità sismica (R)	27
Frequenza fondamentale di Nakamura (F_0)	27
Categorie del sottosuolo di fondazione	27
CATEGORIE DI SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE SECONDO LE NTC DEL 2018.....	28
Risultati delle indagini sismiche	29
Correlazioni geotecniche	32
Correlazione ϕ -Vs.....	32
Correlazione Cu-Vs	32
Portanza	32

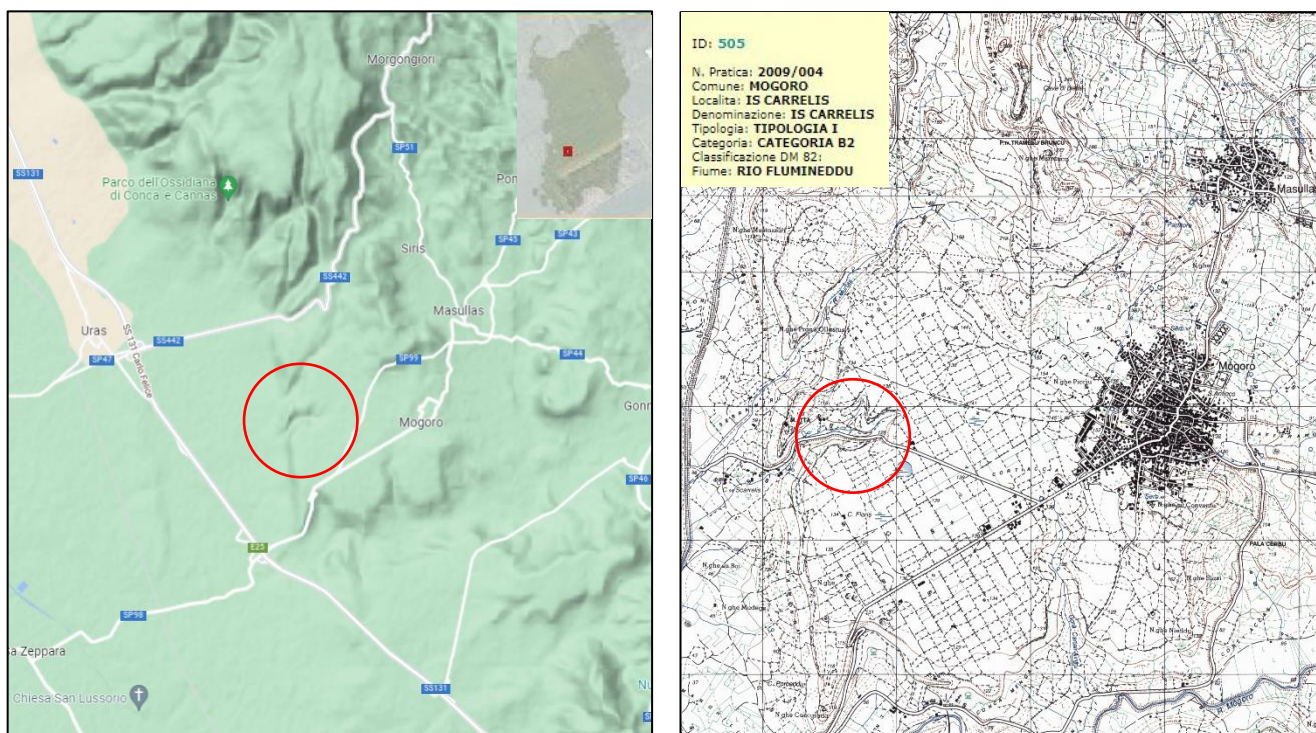


PREMESSA

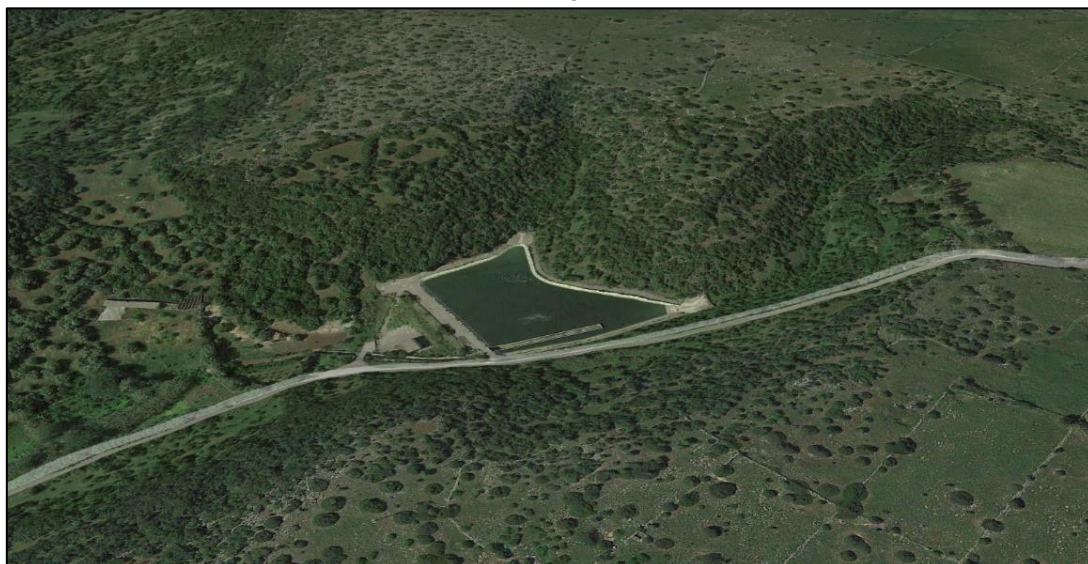
Su incarico conferito nel mese di dicembre 2022 allo scrivente, Dott. Geol. Giancarlo Carboni, con Studio Tecnico in Villacidro, via Nazionale n° 277, iscritto all'Ordine dei Geologi della Sardegna con il n° 497 dalla dott. geol. Simone Manconi è stata realizzata una campagna d'indagine geofisica con metodi della tomografia geoelettrica e della sismica con metodologia MASW e tomografia sismica a rifrazione, con misura dei valori di resistività, caricabilità e velocità di propagazione delle onde Vp e Vs, allo scopo di avere utili indicazioni relativamente allo studio condotto per la verifica della stabilità del corpo della diga ai sensi della L.R. 12/2007 della diga Is Carrelis sita in agro di Mogoro (OR).

Al presente lavoro ha fattivamente collaborato il dott. Geol. Iosto Lecca.

Inquadramento geografico e topografico



Vista aerea della diga Is Crabilis





GENERALITÀ SULL'INDAGINE GEOFISICA

La caratterizzazione stratigrafica dei terreni può risultare alquanto complessa, soprattutto se le aree da investigare sono piuttosto estese e difficilmente praticabili con i tradizionali mezzi di indagine geognostica. Infatti, l'eterogeneità e la complessità dell'assetto stratigrafico locale comporterebbe spesso l'esecuzione di un elevato numero di rilievi geognostici, dal momento che l'informazione che essi forniscono è del tutto puntuale. La delimitazione delle aree su cui concentrare rilievi specifici rappresenta, quindi, un passaggio necessario per l'ottimizzazione della ricerca. I metodi geofisici sono in grado di fornire una rappresentazione globale dei volumi sepolti in termini di distribuzione verticale e laterale dei parametri fisici che caratterizzano le aree da investigare. In tal modo il numero delle indagini può essere notevolmente ridotto e concentrato in aree indicate dall'indagine geofisica o laddove è necessario acquisire informazioni di maggior dettaglio.



Ubicazione in coordinate UTM WGS84 dello stendimento geoelettrico

Rilievo geofisico	Est	Nord
TG inizio	478 500	4 392 686
TG fine	478 518	4 392 618
TS inizio	478 507	4 392 686
TS fine	478 526	4 392 620



PROSPEZIONE GEOELETTICA

Nella prospezione geoelettrica il parametro fisico che si determina è la resistività elettrica delle formazioni che costituiscono il sottosuolo.

La geoelettrica si basa sul principio che le rocce sono conduttrici di elettricità, e tale capacità di condurre corrente varia a seconda del tipo di roccia, delle sue condizioni (alterazione, fessurazione, porosità, ecc.), del suo contenuto d'acqua, del contenuto di minerali come solfuri e ossidi, dal grado di salinità dell'acqua contenuta nei pori.

Perché l'indagine geoelettrica permette di ricostruire un modello interpretativo del sottosuolo, si può avere attraverso un utilizzo mirato della stessa una stima della stratigrafia a piccola, media e grande profondità e per la ricerca di accumuli idrici sotterranei.

Nell'ambito delle metodologie geofisiche correntemente utilizzate per l'esplorazione del sottosuolo, un notevole contributo è dato dalle prospezioni di tipo geoelettrico. La prospezione geoelettrica consiste nella determinazione sperimentale del parametro della resistività apparente, attraverso misure congiunte di intensità di corrente elettrica inviata nel sottosuolo mediante una coppia di elettrodi infissi nel terreno, e di tensione ai capi di una seconda coppia di elettrodi, anch'essi in contatto diretto col suolo.

L'analisi del comportamento della resistività apparente, al mutare della dimensione e posizione del dispositivo elettrodico di misura, permette di evidenziare efficacemente i contrasti di resistività esistenti nel sottosuolo, nell'ambito dei volumi investigati, fornendo così informazioni sulla presenza di discontinuità strutturali (faglie, superfici di scorrimento, etc.), sulla presenza ed andamento nel sottosuolo delle falde acquifere e sull'individuazione di fenomeni di inquinamento delle falde e dei suoli.

Allo scopo di definire la più appropriata metodologia d'intervento è di fondamentale importanza la definizione dell'assetto stratigrafico di dettaglio, l'individuazione di eventuali acque d'infiltrazione sub superficiali o di acquiferi a media profondità. È noto come l'acqua sia un elemento particolarmente destabilizzante e spesso costituisce la causa innescante dei movimenti franosi oltreché spesso dei cedimenti strutturali.

In questo lavoro si presenta una tipologia d'approccio utilizzata per l'analisi dei dati ottenuti con il metodo geoelettrico. Di fatto esso rappresenta una metodologia di ricognizione capace di individuare la distribuzione più probabile di anomalie di resistività, visualizzando la geometria dei corpi sepolti all'interno del volume del sottosuolo esplorato.

Tale approccio si differenzia da quelli adottati nei metodi classici d'inversione, i quali, basandosi sul procedimento della deconvoluzione dei minimi quadrati, operano un confronto tra il modello del sottosuolo ottenuto sperimentalmente ed un modello teorico, attraverso test di bontà del confronto. Ciò implica, però, l'assegnazione a priori di alcuni parametri da parte dello sperimentatore, per interpretare il problema geofisico.

Il metodo d'inversione tomografica qui utilizzato si svincola da questa procedura, utilizzando un algoritmo che è completamente indipendente dai parametri introdotti a priori.



Il lavoro di ricerca realizzato in questo lavoro si sviluppa nel seguente modo:

1. Pianificazione delle operazioni effettuate nel sito d'indagine, definendo le tecniche di acquisizione dati di resistività apparente lungo i profili scelti, e le tecniche utilizzate per l'abbattimento del rumore sul segnale utile.
2. Presentazione del risultato dell'analisi dei dati sottoposti ad una valutazione comparativa attraverso il tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Tale rappresentazione di fatto viene definita come una pseudosezione di resistività del sottosuolo lungo il profilo scelto.
3. Il metodo d'interpretazione sopra citato, viene applicato ai dati ottenuti nel sito investigato con l'intento di individuare e definire la stratigrafia locale e l'eventuale presenza di acque sotterranee superficiali.

RESISTIVITÀ APPARENTE

Se effettuiamo misure di distanze fra gli elettrodi, di corrente I e di differenze di potenziale V allo stesso modo in cui le effettuiamo nel caso del sottosuolo omogeneo, il risultato che otterremo sarà un valore di "*resistività fittizia*" definita anche "*pseudoresistività*".

Nel caso di un semispazio omogeneo ed isotropo di resistività ρ , abbiamo precedentemente visto come, mediante misure di intensità di corrente fluente nel sottosuolo dall'elettrodo A a quello B, e misure di differenza di potenziale ai capi degli elettrodi M e N, è possibile determinare la resistività del sottosuolo con la seguente formula:

$$\rho = K_g \frac{\Delta U_{MN}}{I}$$

essendo K_g il fattore geometrico del dispositivo utilizzato.

La possibilità di operare su un semispazio omogeneo è piuttosto rara. Nella realtà il sottosuolo è caratterizzato dalla presenza di superfici di discontinuità lungo le quali si hanno brusche variazioni della resistività.

Se effettuiamo misure di distanze fra gli elettrodi, di corrente I e di differenza di potenziale V allo stesso modo in cui le effettuiamo nel caso del sottosuolo omogeneo, il risultato che otterremo sarà un valore di "*resistività fittizia*" definita anche "*pseudoresistività*".

In generale tale valore dipenderà dalle resistività reali appena citate, e dalle distanze interelettrodeiche. Il valore di resistività fittizia che si ottiene non deve essere considerato né una media aritmetica, né ponderata delle tre resistività vere presenti nel sottosuolo, dato che può accadere che essa assuma un valore addirittura maggiore o minore di tutte e tre le resistività reali.

La resistività fittizia ρ_a , ottenuta applicando ad un sottosuolo eterogeneo l'espressione corrispondente al semispazio omogeneo, è detta "*resistività apparente*". Essa è usualmente definita, per un semispazio disomogeneo, come la



resistività di un ipotetico sottosuolo omogeneo ed isotropo sulla cui superficie, a parità di dispositivo elettrodico e d'intensità di corrente, si misura una differenza di potenziale uguale a quella del mezzo disomogeneo.

Quindi la resistività apparente è la variabile sperimentale che si ottiene dalle misure effettuate con il metodo geoelettrico, e che si utilizza nel processo di interpretazione.

DISPOSITIVI ELETTRODICI

Esistono diversi tipi di dispositivi elettrodici, ognuno caratterizzato da una diversa disposizione degli elettrodi sul terreno.

DISPOSITIVI ELETTRODICI DIPOLARI

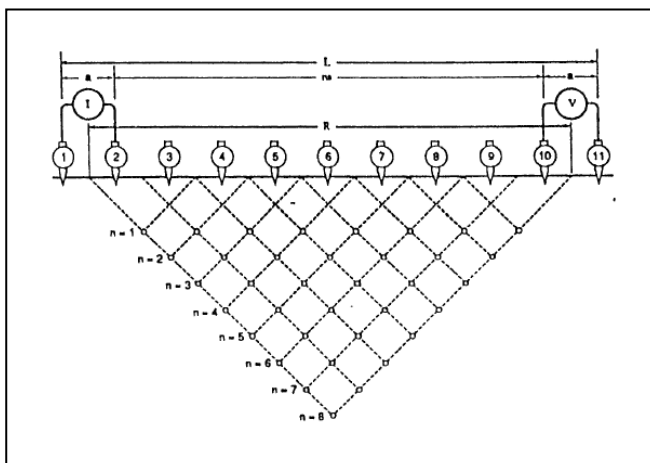
I dispositivi elettrodici dipolari costituiscono una famiglia di dispositivi molto importante, caratterizzata dal fatto che in essi gli elettrodi di corrente A e B, sono fra loro molto ravvicinati rispetto alla distanza alla quale si valutano i loro effetti, tanto da potersi considerare come un dipolo. La valutazione degli effetti del dipolo di corrente AB viene effettuata tramite un secondo dipolo MN, detto di tensione.

In particolare, il dispositivo dipolare che è stato utilizzato per l'indagine geoelettrica oggetto della presente indagine è il dipolo-dipolo detto anche dipolare assiale.

In questo tipo di dispositivo i due dipoli, di corrente e di misura, giacciono entrambi sulla retta congiungente i loro centri.

La tecnica della geoelettrica *dipolare di superficie*, utilizzata per la prospezione geofisica, consiste nella realizzazione di un'immagine 2D di estremo dettaglio del comportamento areale della resistività elettrica lungo il piano della sezione verticale passante per i profili scelti per la prospezione.

La notevole risoluzione fornita da tale tecnica permette di discriminare molto più efficacemente i contrasti di



resistività esistenti nel sottosuolo. In particolar modo, il metodo geoelettrico risulta tra i più idonei per l'individuazione e la definizione di acquiferi, in quanto le caratteristiche elettriche del sottosuolo sono fortemente influenzate dalla presenza di acque vadoze. Di conseguenza si possono ottenere informazioni di dettaglio sui percorsi d'infiltrazione delle acque sotterranee, spesso molto articolati, e sull'evoluzione nel tempo della loro diffusione, qualora l'indagine geoelettrica venga ripetuta periodicamente.



Il procedimento di campagna per la realizzazione d'una pseudo-sezione con la tecnica dipolare assiale è mostrato schematicamente nella figura:

Attraverso i due elettrodi di corrente contigui A e B, posti ad una distanza "a" l'uno dall'altro, si immette una corrente elettrica di intensità nota nel sottosuolo. La misura di tensione, creata dal flusso di corrente, è effettuata mediante il dipolo di tensione, in linea con il precedente, anch'esso caratterizzato da due elettrodi contigui, M e N, distanziati di nuovo "a" l'uno dall'altro. La distanza tra gli elettrodi di corrente e di potenziale più vicini tra loro, precisamente B ed M, è regolata in maniera tale da risultare un numero intero n di volte la distanza dipolare "a".

La procedura tomografica di campagna consiste nell'eseguire vari transetti lungo il tracciato, ciascuno dei quali corrisponde ad un'assegnata posizione di uno dei due dipoli lungo il profilo, che viene mantenuto fisso, mentre l'altro dipolo si allontana progressivamente da questo lungo il medesimo profilo, assegnando valori crescenti ad n (1, 2,, N).

La rappresentazione più adeguata dell'insieme di tutti i risultati conseguiti consiste nell'attribuire ciascun valore di resistività apparente al punto di intersezione tra due linee oblique, convergenti verso il basso, spiccate con un'angolazione di 45° dai centri dei due dipoli, ubicati nelle posizioni cui competono le misure di corrente e di tensione dalle quali nasce il valore di resistività apparente in considerazione. Risulta evidente che all'incrementare di n, aumenta la distanza R tra i centri dei due dipoli e, di conseguenza, la profondità a cui si riferisce la misura.

Le resistività apparenti, distribuite nei punti della griglia che si viene a formare come conseguenza delle diverse disposizioni mutue dei due dipoli, vengono successivamente sottoposte ad una valutazione comparativa, che si concretizza nel tracciamento di una famiglia di isolinee di resistività apparente. Il quadro d'insieme che ne deriva, ulteriormente rifinito con l'uso di una scala di colori o di grigi o con altri mezzi di contrasto tra settori contigui, rappresenta di fatto una *pseudo-sezione* del sottosuolo lungo il profilo scelto.

La massima profondità di indagine che si raggiunge con l'uso di questa tecnica è teoricamente pari alla metà della massima distanza raggiunta tra i due dipoli lungo il profilo scelto. In realtà, questo discorso risulta valido solo se il sottosuolo nell'area di indagine è elettricamente omogeneo in modo da supporre regolare e semisferica la distribuzione delle linee di corrente. Poiché in generale il sottosuolo è tutt'altro che omogeneo (presentando eterogeneità sia verticali che laterali di ρ la reale profondità di investigazione raggiunta risulterà essere diversa da quella teorica, generalmente pari a 1/6 della massima lunghezza dello stendimento; da cui i termini di pseudo-sezione, pseudo-profondità e pseudo-resistività (o resistività apparente).

DISPOSITIVI ELETTRODICI QUADRIPOLARI

In aree con spazi aperti limitati per l'esecuzione di lunghe linee di sedimento, la disposizione convenzionale di Wenner ha lo svantaggio di comportare una forte riduzione della copertura laterale quando la spaziatura degli elettrodi viene incrementata per aumentare la profondità d'indagine. Per esempio, per raddoppiare la profondità di indagine, la spaziatura a degli elettrodi deve essere portata a $2a$ (vedi figura sotto). In questo caso, la lunghezza totale dello stendimento viene incrementata da $3a$ a $6a$. Contemporaneamente, la larghezza della pseudosezione diminuisce di $3a$ per ogni livello di misura. Al confronto, la larghezza della pseudosezione diminuisce di $2a$ per lo stendimento Wenner-Schlumberger.

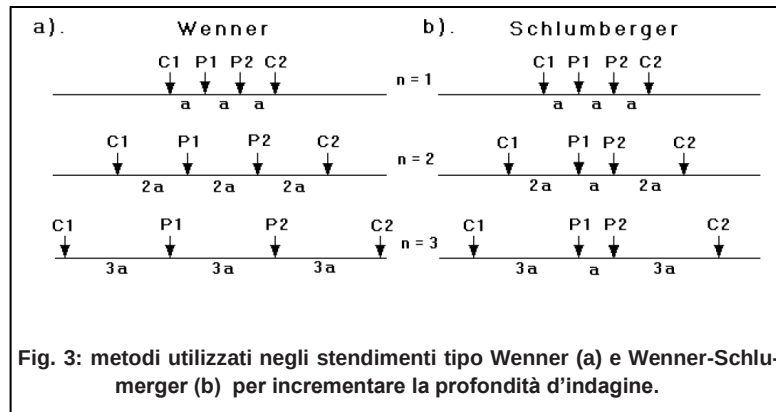
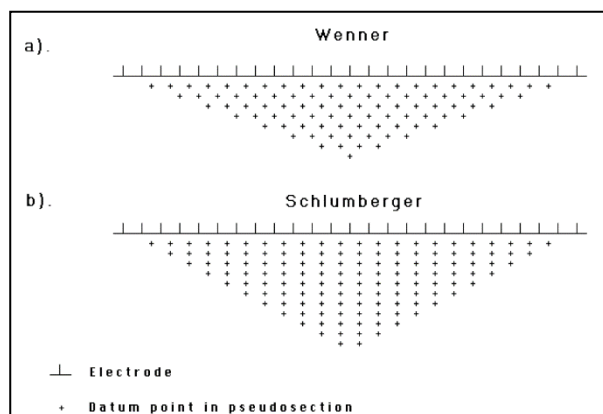


Fig. 3: metodi utilizzati negli stendimenti tipo Wenner (a) e Wenner-Schlumberger (b) per incrementare la profondità d'indagine.

La resistività apparente per la disposizione elettrodica Wenner-Schlumberger è data da

$$\rho = \pi \cdot n(n+1) \cdot a \cdot R$$

dove R è la resistività misurata, a è la spaziatura tra gli elettrodi $P1$ e $P2$ ed n è il rapporto della distanza tra gli elettrodi $C1-P1$ e $P1-P2$. Questa disposizione diventa effettivamente di tipo Schlumberger quando il fattore n è maggiore di 2. Perciò è al momento una combinazione della disposizione Wenner e Schlumberger adattato per l'uso con una disposizione con una linea di elettrodi con spaziatura costante (come viene normalmente utilizzata nella tomografia elettrica). Inoltre questo stendimento presenta una migliore copertura orizzontale e una profondità di penetrazione



maggiore del 15% rispetto allo stendimento Wenner. In pratica, dal momento che il potenziale tra gli elettrodi $P1$ e $P2$ decresce all'incremento del fattore n , il massimo valore di n usato nelle ricerche sul campo è circa 8. Per incrementare la profondità di investigazione, la spaziatura tra gli elettrodi $P1-P2$ viene incrementata di $2a$ e le misurazioni sono ripetute per n pari a 1, 2, 3, 4, 5, e 6. In seguito, la spaziatura tra $P1-P2$ viene incrementata di $3a$, e si esegue la stessa sequenza di misure.

Un vantaggio dello stendimento Wenner normale è il suo elevato rapporto segnale-disturbo rispetto alle altre tradizionali disposizioni elettroniche. Tale disposizione è da preferire in quelle aree caratterizzate da un segnale elettrico con un disturbo piuttosto elevato.

MODELLI DI RESISTIVITÀ 2D

Un sondaggio elettrico 2D è un'indagine bidimensionale che permette lo studio delle variazioni di resistività sia lungo la direzione verticale che lungo una direzione orizzontale. Con le configurazioni dell'array precedentemente descritte è possibile compiere misure di resistività apparente dalle quali, attraverso un processo di inversione, si deduce una sezione di resistività 2D (tomografia elettrica) del sottosuolo.

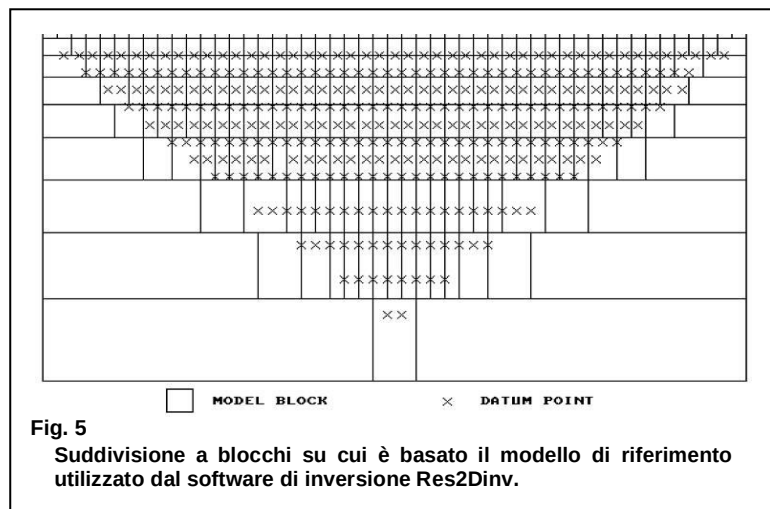
Oltre a permettere lo studio di strutture geometricamente complesse ed articolate, questo tipo di indagine può essere applicato anche in presenza di irregolari morfologie del terreno; ovviamente l'attendibilità del risultato dipende anche dalla conoscenza dell'andamento topografico della zona indagata.

Per l'inversione dei dati geoelettrici acquisiti in campagna è stato utilizzato il software Res2Dinv (Geotomo Software). Il processo di inversione ha la prerogativa di cercare di individuare un modello geometrico del sottosuolo che sia compatibile con le misure raccolte. Il software Res2Dinv utilizza un metodo di inversione basato sui minimi quadrati che permette di determinare un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo (pseudosezione).

Il punto di partenza per il processo di inversione sono i dati acquisiti in campagna ed opportunamente formattati per essere letti dal software (.dat). In base alle condizioni ambientali in cui si è svolta la fase di acquisizione, è possibile un'attenta calibrazione del modello teorico attraverso la configurazione di diversi parametri. Il software attraverso una serie di iterazioni successive mira a ridurre la differenza tra i valori di resistività apparente misurati e quelli calcolati dal

modello teorico.

Il modello di riferimento utilizzato dal software è basato su una suddivisione a blocchi in cui la dimensione e la posizione delle celle è fissa. I parametri del modello sono i valori delle celle, mentre i dati sono i valori di resistività misurati. Nell'inversione ad ogni cella viene assegnato un valore di resistività (calcolato) ottenuto invertendo i valori di resistività misurati.



I risultati ottenuti dalle inversioni sono delle tomografie elettriche che rappresentano modelli di resistività del sottosuolo ad alta risoluzione, il cui errore, rispetto alle misure compiute, è segnalato dal parametro RMS (Root Mean Square error).

STRUMENTAZIONE TOMOGRAFIA GEOELETRICA UTILIZZATA

L'indagine geoelettrica eseguita ha riguardato l'esecuzione di una tomografia geoelettriche con metodologia dipolare (dipolo-dipolo) e quadripolare (Schlumberger) lungo il coronamento della diga.



A tal proposito, la scelta della metodologia geoelettrica è senza dubbio tra le più idonee, data la sua capacità di esaltare eventuali anomalie, in termini di forti contrasti di resistività, imputabili alla presenza di acque d'infiltrazione sotterranee nei volumi di terreno investigati.

Per l'esecuzione delle misure geoelettriche di cui si discute è stato utilizzato un georesistivimetro monocanale realizzato dalla ditta GF Instruments mod. ARES G4, alimentato con batteria al piombo ricaricabile. Questo strumento è stato progettato per effettuare una serie completa di stendimenti geoelettrici: sondaggi elettrici verticali, profili di resistività, misure multi-elettrodo per tomografie elettriche 2D e 3D, misure di polarizzazione indotta e di potenziali spontanei.

Esso è costituito dall'apparato di energizzazione (immette corrente nel terreno attraverso gli elettrodi A e B), e dall'apparato di ricezione (misura la differenza di potenziale tra gli elettrodi di tensione M e N); racchiude, infatti, tre unità principali: *trasmettitore*, *ricevitore* e *microprocessore*.

Il trasmettitore, isolato elettricamente, è costituito da un generatore di tensione in continua, provvisto di commutatore automatico della polarità, per l'invio nel sottosuolo, tramite gli elettrodi del dipolo energizzante, di un flusso di corrente continua la cui intensità può variare fino a raggiungere un'intensità massima di 2.0 A ed un voltaggio compreso tra 10 e 550 V con una potenza massima di 300 W.

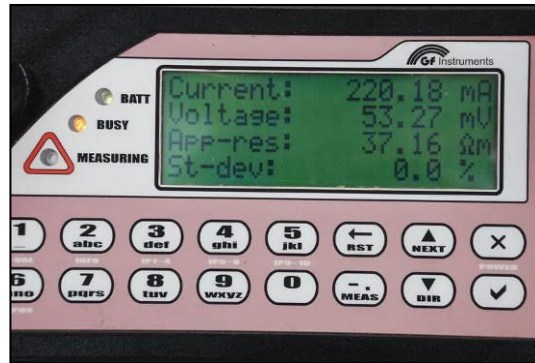
L'Ares G4 viene collegato ad un commutatore con cui è possibile programmare la gestione automatica degli elettrodi dello stendimento, ottenendo un elevato numero di combinazioni tra gli elettrodi nonché un notevole risparmio di tempo.

Al cavo multielettrodico del georesistivimetro sono collegati contemporaneamente tutti gli elettrodi attraverso appositi connettori. In base all'array prescelto, l'unità switch (commutatore) seleziona le coppie di elettrodi da energizzare.

La durata della fase di energizzazione, ossia di immissione di corrente nel terreno, è stata determinata nel corso della misura in base al rapporto segnale-rumore caratteristico del sito. *Il ricevitore* è costituito da un millivoltmetro digitale collegato a un *microprocessore*, che memorizza i valori di tensione ai capi degli elettrodi del dipolo di misura con un passo di campionamento regolare e tale da rientrare un numero intero di volte nel ciclo completo di un'onda di corrente. Alla fine di ogni ciclo, inoltre, un software di esercizio fornisce il valore della resistenza (visualizzato su un display digitale in Ohm·m) come rapporto tra la media di tutte le stime della tensione di picco, riferite ai cicli di corrente via via susseguirsi, e l'intensità della corrente preselezionata.



Strumento di misura Ares G4



Particolare del display



Connessione tra cavi multipolari ed elettrodi in acciaio inox



Connessione tra le sezioni di cavi multipolari

È opportuno qui evidenziare che la procedura computerizzata appena descritta, detta *stacking* mira ad isolare il segnale utile di tensione, ovvero il segnale direttamente collegato alla corrente di energizzazione, mediante il processo di rimozione immediata del fattore di disturbo stazionario (generato da fenomeni di polarizzazione spontanea), e di abbattimento progressivo di quello casuale (provocato da sorgenti naturali e/o artificiali spurie di vario genere).

Il primo obiettivo si raggiunge facilmente grazie all'inversione della polarità del flusso di corrente continua nel sottosuolo, cioè mediante l'invio di onde quadre di corrente.

Il secondo obiettivo, invece, viene raggiunto tramite quella proprietà dei processi stocastici che afferma che la somma di m elementi di un rumore casuale comunque selezionati ne attenua la portata rispetto ad un segnale coerente di un fattore pari alla radice quadrata di m . La scelta del numero di cicli da utilizzare è legata all'entità del disturbo: quanto più esso è forte tanto maggiore deve essere il numero di cicli. Lo strumento utilizzato è dotato di un software interno che regola automaticamente il numero di cicli di misura sulla base delle impostazioni dell'operatore, finché non viene raggiunto un segnale ottimale.



OPERAZIONI DI CAMPAGNA

La campagna di misure è stata preceduta da un sopralluogo di dettaglio nell'area di interesse, al fine di definire precisamente l'ubicazione dei profili lungo cui effettuare le tomografie dipolari.

La traccia del profilo geoelettrico è indicato nella planimetria con la sigla TG (linea continua in rosso).

Le misure sono state effettuate mediante l'esecuzione di una tomografia geoelettrica attraverso il coronamento della diga utilizzando 24 elettrodi con distanza interelettrodica di 3 m e per una lunghezza complessiva di 69 m.

Le misure sono state eseguite con le configurazioni dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner, il tempo di energizzazione per il dipolo-dipolo e Wenner è stato di 0.5 s e di 1.0 s per la configurazione di Schlumberger, con quest'ultimo sono state anche eseguite delle misure di polarizzazione indotta con due finestre di caricabilità, rispettivamente di: 0.10 s e 0.50 s.

RAPPRESENTAZIONE DELLE PSEUDOSEZIONI

Nel presente capitolo vengono presentate le tomografie elettriche elaborate con i relativi dettagli tecnici e l'interpretazione geologica. Per ottenere una chiave interpretativa omogenea e funzionale si ha la necessità di utilizzare una rappresentazione grafica delle tomografie che permetta una immediata comprensione dei livelli di interesse.

Facendo riferimento alle misure di resistività è importante considerare le proprietà degli spessori investigati determinanti per la risposta geoelettrica. Allo stesso tempo è cruciale valutare i processi geologici che influiscono direttamente sulla resistività propria degli spessori. Questi processi, tranne rare eccezioni, tendono generalmente ad abbassare i valori di resistività.

Il contesto geologico obbliga inoltre ad inserire all'interno del quadro di analisi l'eventuale alterazione delle rocce del substrato che generalmente fa diminuire i valori di resistività di ordini di grandezza. Fenomeni di fratturazione e faglie, unitamente a fenomeni di dissoluzione associati, aumentano la permeabilità e conseguentemente determinano un abbattimento dei valori di resistività. Ci si attende inoltre l'influenza dell'alterazione per idrolisi dei minerali primari che determina una sensibile diminuzione dei valori di resistività. L'insieme di questi fattori è da tenere in considerazione nell'interpretazione dei rilievi e nella precedente scelta della scala di rappresentazione.

Sono state rappresentate le interpretazioni dei profili ottenuti con le metodologie del dipolo-dipolo e Schlumberger.

Sono state utilizzate differenti configurazioni elettrodiche nel medesimo profilo perché queste hanno differenti caratteristiche nella capacità di acquisire il dato geoelettrico: il dipolo-dipolo è la configurazione con la più alta risoluzione in assoluto, fornisce una elevata sensibilità in senso orizzontale, ma per via della limitata distanza degli elettrodi di misura MN è soggetto ad una perdita di sensibilità in profondità. Vista la limitata lunghezza dello stendimento adottata e la potenza dello strumento, la perdita di sensibilità è stata comunque trascurabile.



La configurazione di Schlumberger pur essendo meno dettagliata mantiene un buon compromesso tra risoluzione d'indagine e sensibilità nelle misure acquisite più in profondità, ha una risoluzione verticale talvolta superiore al dipolo-dipolo e minore sensibilità ai disturbi.

La configurazione di Wenner è quella con minore risoluzione, ma ha il vantaggio di avere il miglior rapporto segnale-disturbo e ha una migliore capacità nel distinguere le discontinuità stratigrafiche orizzontali.

ESECUZIONE DELL'INDAGINE GEOELETRICA



Acquisizione delle misure geoelettriche



Vista stendimento cavi



Collegamento elettrodo-cavo

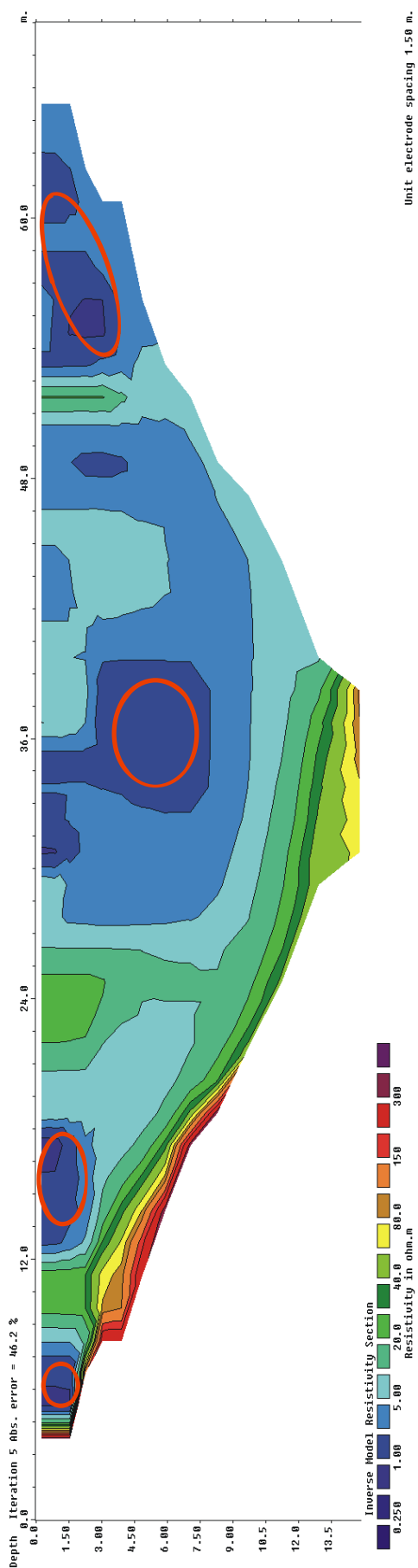


Vista stendimento cavi

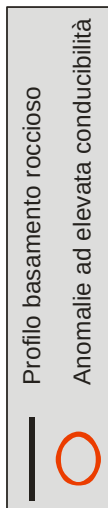
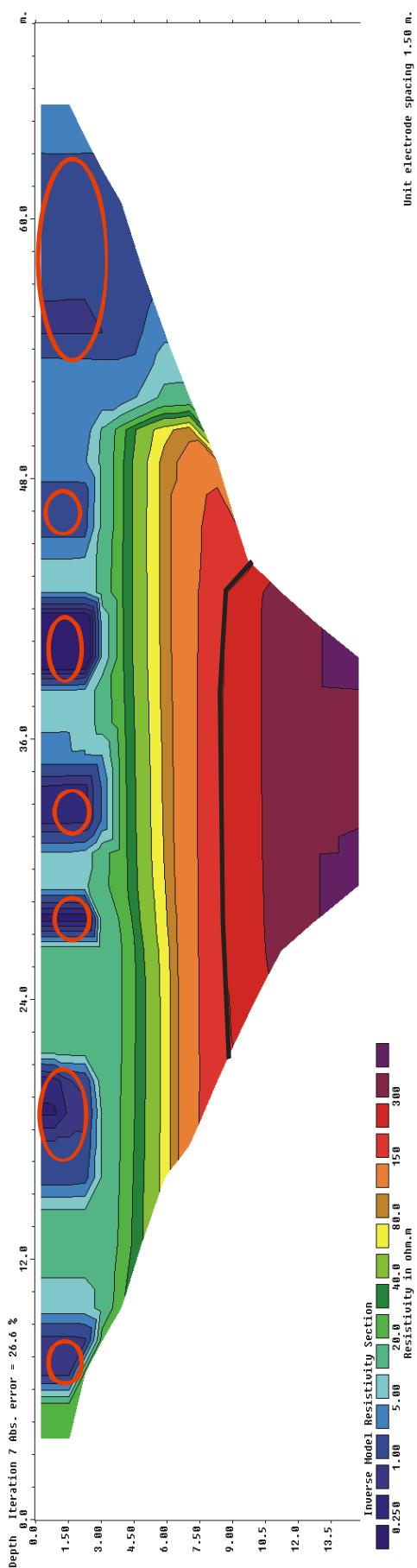


SEZIONI DI RESISTIVITÀ

SEZIONE CONFIGURAZIONE DIPOLLO-DIPOLO

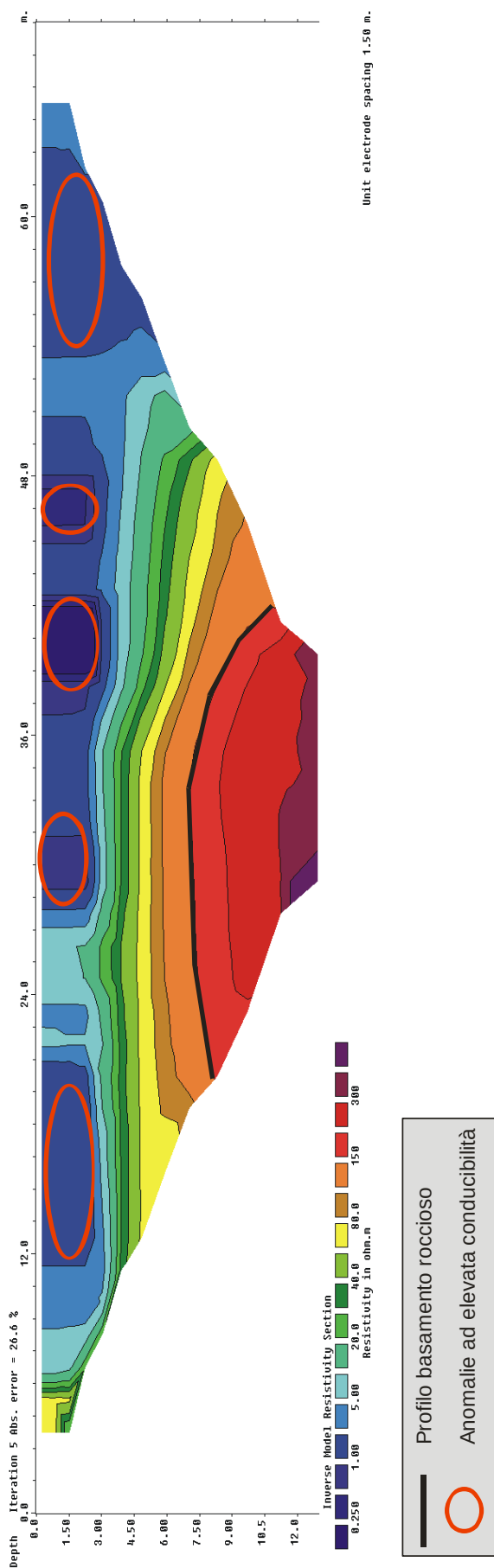


SEZIONE CONFIGURAZIONE SCHLUMBERGER





SEZIONE CONFIGURAZIONE WENNER





DESCRIZIONE DELLE SEZIONI DI RESISTIVITÀ DELLE INDAGINI GEOELETTRICHE

L'analisi delle pseudo sezioni ottenute evidenzia come le due configurazioni elettrodiche quadripolari (Schlumberger e Wenner) utilizzate abbiano dato in generale dei risultati omogenei, riuscendo ad individuare in maniera abbastanza netta quello che dovrebbe essere il basamento roccioso su cui poggia il corpo della diga, mentre la configurazione dipolo-dipolo non ha fornito riscontri altrettanto attendibili, probabilmente a causa di disturbi provocati dalla presenza di una rete metallica a maglio romboidale utilizzata per stabilizzare il terreno, ma ormai ricoperta di suolo e vegetazione, che di fatto ha creato delle anomalie di resistività a cui la configurazione dipolare si è dimostrata particolarmente vulnerabile. Alla luce di quanto esposto, le analisi elettrostratigrafiche si sono basate sui riscontri ottenuti con le sole configurazioni quadripolari.

Le sezioni evidenziano un andamento elettrostratigrafico caratterizzato dalla presenza di una copertura superficiale irregolare costituita da settori caratterizzati da resistività bassa ($0.5 \Omega m < \rho < 2 \Omega m$) attribuibile alla parte più superficiale del corpo della diga, formato da argille sabbiose molto umide, anche per via della vegetazione arbustiva presente; infatti, l'abbondante humus presente nel terreno, contribuisce ad abbattere notevolmente i valori di resistività.

Oltre i 3-4 m di profondità i valori di resistività crescono repentinamente individuando la parte più interna del corpo della diga, caratterizzata da valori di resistività medi ($20 \Omega m < \rho < 100 \Omega m$) compatibili con sabbie argillose con normali tenori di umidità.

Oltre i 7-8 m di profondità i valori di resistività salgono raggiungendo l'ordine delle centinaia di Ohm-metro, compatibili con un substrato marnoso argilloso alterato. Individuando così il substrato litoide.

Sulle sezioni geoelettriche è stato graficamente rappresentato il probabile basamento litoide, mentre i punti di anomalia conduttiva sono stati indicati con un cerchio rosso, i quali risultano, rispetto all'inizio del profilo, indicati nella tabella sottostante:

Punto di anomalia	1	2	3	4	5	6	7
Distanza da inizio profilo geoelettrico (m)	7.5	19	28	33	42	46	58

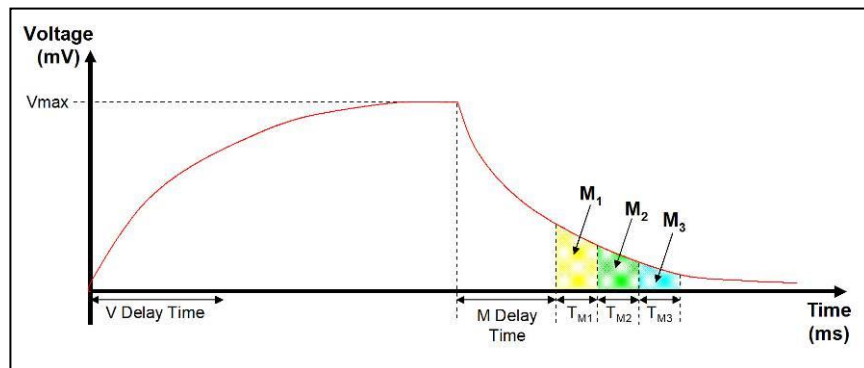
Tutti i punti di anomalia di conducibilità individuati sono sub superficiali, pertanto si attribuiscono a valori puntuali di bassa resistività legati alla combinazione della presenza di humus con elevati tenori di umidità in terreno argilloso. Pertanto non si ritiene che possano interessare il corpo profondo della diga.

MISURE DI POLARIZZAZIONE INDOTTA

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.



La PI comprende un insieme di fenomeni transitori che avvengono nel terreno, se sottoposto ad un campo elettrico applicato tramite un dispositivo quadripolare ABMN, dove AB sono gli elettrodi di corrente ed MN quelli di potenziale. Se si energizza il terreno con una corrente di intensità costante I attraverso gli elettrodi AB per un certo tempo T , e si misura il potenziale di equilibrio tra gli elettrodi MN, si osserverà che qualche formazione nel sottosuolo manifesterà il fenomeno della polarizzazione. Nel momento in cui si interrompe la corrente elettrica agli elettrodi A e B, la differenza di potenziale misurata tra M e N non si azzerava istantaneamente ma si scarica in un determinato tempo seguendo l'andamento riportato in figura.



Il processo di carica e di scarica in funzione del tempo

La durata di questo fenomeno è variabile e può raggiungere a volte parecchi secondi: si tratta pertanto di un fenomeno elettrico relativamente lento e temporaneo. Quello che si misura è l'area sottesa dalla curva di decadimento del potenziale $V(t)$, per un intervallo di tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, in rapporto con il potenziale registrato prima dell'inizio del processo di scarica V_0 :

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_0}$$

La grandezza M è detta caricabilità ed è generalmente misurata in millisecondi.

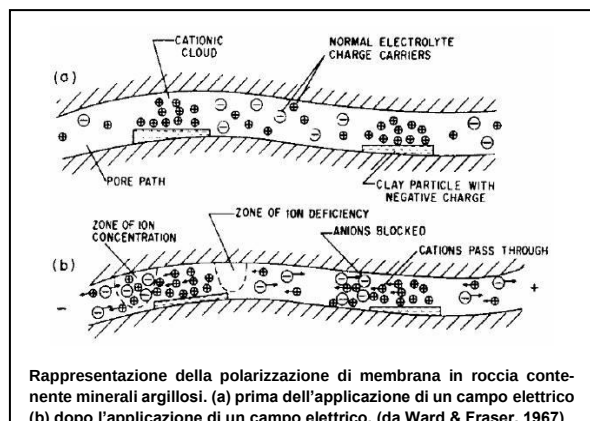
Il fenomeno fisico può essere spiegato modellando il terreno come una distribuzione di condensatori che si caricano e si scaricano attraverso delle resistenze. Il tempo richiesto per ripristinare le condizioni di equilibrio è funzione del grado di polarizzabilità del terreno. I principali fattori che determinano la PI sono:

- la composizione mineralogica,
- la tessitura,
- la percentuale d'acqua (umidità naturale),
- la composizione chimica dell'acqua interstiziale (elettrolita).

I fenomeni che avvengono a livello microscopico nel materiale sottoposto a corrente elettrica sono globalmente di due tipi: polarizzazione elettrodica e polarizzazione di membrana.



La polarizzazione elettrodica è la tipica polarizzazione dei metalli, nei quali le cariche sono libere di migrare e disporsi in modo tale da creare dipoli. Questo tipo di polarizzazione è tipica nelle indagini minerarie.



La polarizzazione di membrana si ha quando alle pareti dei pori del terreno si affacciano minerali d'argilla. Le argille sono materiali coesivi idrati, a comportamento plastico, i cui minerali argillosi sono generalmente caratterizzati da dimensioni inferiori a 5 μm . In particolare essi sono costituiti da fillosilicati organizzati in strati tetraedrici di silicio ed alluminio e in strati di ottaedri di alluminio, ferro ed altri cationi. In base a come si interfacciano gli strati tetraedrici ed ottaedrici si osserva una forte variabilità della composizione chimica, delle proprietà di scambio e delle risposte geofisiche. Nei sedimenti

sciolti esiste una percentuale ottimale dei minerali d'argilla per la polarizzazione di membrana; tale concentrazione è compresa tra il 3% e l'8%, quindi la massima polarizzabilità per un sedimento sciolto si ha per sabbie limoso-argillose. Le argille pure, data l'inesistenza dei pori, non polarizzano. La polarizzazione di membrana pertanto è particolarmente importante nelle rocce contenenti una bassa percentuale di argilla nella matrice. Occorre infine ricordare che non tutti i minerali d'argilla hanno la stessa efficacia nell'adsorbimento cationico. L'effetto della polarizzazione di membrana aumenta notevolmente in contesti porosi in cui le particelle d'argilla bloccano parzialmente il passaggio alle soluzioni di ioni. La nuvola cationica di diffusione in vicinanza della superficie del minerale argilloso è una caratteristica del sistema argilla-elettrolita. Applicando un potenziale elettrico, le cariche positive manifestano una elevata mobilità attraverso la nube cationica, mentre quelle cariche negative tendono ad accumularsi; si ha quindi una membrana ione-selettiva la quale, all'eliminazione del potenziale elettrico, ostacola la mobilità delle cariche negative e rallenta la riconfigurazione della neutralità elettrica.

Il processo di acquisizione di misure di caricabilità è estremamente delicato: in condizioni ideali bisognerebbe utilizzare sonde non polarizzabili, tuttavia con i più moderni georesistivimetri è possibile acquisire con i normali elettrodi metallici (nella fattispecie acciaio inox). Infatti il problema dei potenziali spontanei dovuti alla polarizzazione degli elettrodi metallici viene gestito automaticamente dal georesistivimetro, grazie agli elevati rapporti segnale/disturbo e ad opportuni sistemi di filtraggio elettronico del segnale registrato agli MN.

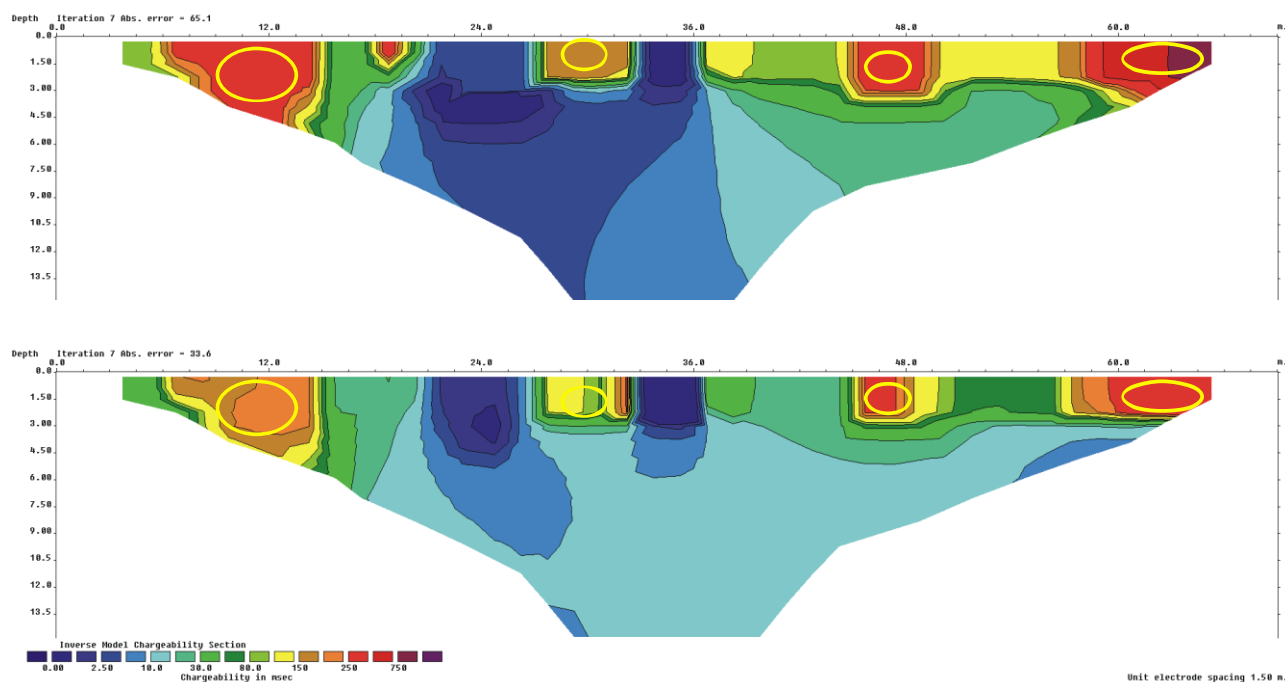
Di seguito si riporta una tabella con alcuni valori tipici di caricabilità di alcuni terreni, rocce e minerali
(da Telford 1990 e Keller 1966)

Materiali e Minerali	Caricabilità (msec)
Pirite	13.4
Galena (solfuro di Piombo)	3.7
Rocce con l'8-20% di solfuri	1000-2000
Rocce con l'2-8% di solfuri	500-1000
Arenarie e Siltiti	100-500
Rocce vulcaniche compatte	100-500
Graniti	10-50
Acque sotterranee	0
Materiale alluvionale	1-4
Ghiaia	3-9



SEZIONI DI POLARIZZAZIONE INDOTTA

SEZIONI DI CARICABILITÀ IN CONFIGURAZIONE SCHLUMBERGER



DESCRIZIONE DELLE SEZIONI DI CARICABILITÀ DELLE INDAGINI GEOELETTRICHE

Come già descritto le misura di polarizzazione indotta o caricaibilità sono state condotte nella configurazione di Schlumberger, questa presenta infatti il vantaggio di avere un miglior rapporto segnale-disturbo rispetto alla configurazione dipolo-dipolo, fattore fondamentale vista la delicatezza della misura effettuata poiché in questi casi si hanno in genere dei valori di caricaibilità piuttosto bassi e pertanto particolarmente soggetti a disturbi.

L'indagine ha individuato diversi settori puntuali caratterizzati da caricaibilità anomala rispetto al corpo incassante costituito dal rilevato in terra della diga, distribuiti nel settore superficiale della sezione geoelettrica e ubicati in adiacenza ai settori altamente conduttivi.

Anche in questo caso si ritiene la caricaibilità misurata sia dovuta alla presenza di acqua in una matrice limoso-sabbiosa con abbondante presenza di sostanza organica (humus), quindi non riconducibili a possibili infiltrazioni di acqua all'interno del corpo della diga.



Sulla rappresentazione grafica delle sezioni sono stati graficamente rappresentati i punti di anomalia con un cerchio a tratteggio giallo e rosso per meglio evidenziarlo dallo sfondo, i quali sono indicati nella tabella sottostante, rispetto all'inizio del profilo e alla profondità dal coronamento della diga:

Punto di anomalia	1	2	3	4
Distanza da inizio profilo geoelettrico (m)	12	30	47	63

Sulla base dell'analisi dei tempi di scarica, i punti n° 1 e 4 sono quelli che presentano la maggiore caricabilità, costituendo così i punti di anomalia principali, mentre i punti n° 2 e 3 presentano dei tempi di scarica intermedi.

Sulla base dei riscontri fin qui ottenuti non rilevano particolari criticità nel corpo dello sbarramento, ad ogni modo si suggerisce di effettuare delle indagini dirette al fine di verificare l'effettiva origine delle anomalie geoelettriche individuate.

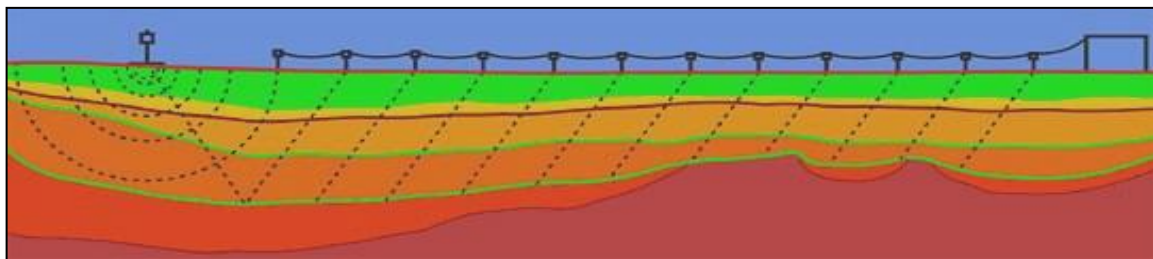


PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

L'esecuzione di indagini sismiche ha lo scopo di ottenere informazioni di tipo geomeccanico sul comportamento fisico-meccanico dei corpi geologici investigati, attraverso la determinazione dei relativi parametri, ed informazioni di tipo geologico sui caratteri strutturali e stratigrafici del volume del sottosuolo indagato.

Si tratta di uno dei metodi attualmente più utilizzati per l'esplorazione in profondità del sottosuolo e consiste nel creare delle onde artificiali nel terreno (energizzazione) battendo una piastra poggiata a terra con una mazza. Le indagini geognostiche che utilizzano le metodologie sismiche sfruttano le proprietà dei terreni di farsi attraversare dalle onde sismiche a diversa velocità; questa dipende da molti fattori, quali la natura mineralogica della roccia, il grado di cementazione e di fatturazione, la porosità, il contenuto in acqua o in gas, ecc.

Le indagini sismiche sono utilizzate per scopi geotecnici, per ricerche minerarie e anche per dare un valore del grado di scavabilità del terreno.



Rappresentazione schematica del principio di funzionamento della prospezione sismica a rifrazione

La sismica a rifrazione fornisce risultati leggibili e interpretabili quando le formazioni litologiche hanno caratteristiche elastiche crescenti con la profondità, mentre non dà indicazioni stratigrafiche quando con l'aumentare della profondità vi sono formazioni con caratteristiche elastiche inferiori (formazione fantasma).

Le prospezioni sono state realizzate con lo scopo di differenziare, in funzione della diversa velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali (onde "P") nei terreni e nelle rocce, i terreni superficiali dal basamento roccioso presente in affioramento in siti limitrofi.

STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata è costituita da un Sismografo DAQLink III (Seismic Source U.S.A.) con convertitore A/D a 24 bit, 24 canali, range dinamico 144db e output dei dati in SEG-Y o SEG-2, l'intero sistema di acquisizione è conforme alle specifiche ASTM D5777-00 (2006) (Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation); l'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante l'utilizzo di una massa battente (mazza di 10 kg con starter su piattello di battuta in alluminio).



Per la ricezione delle onde longitudinali (P), durante l'indagine di tomografia sismica, sono stati usati geofoni verticali Geospace (U.S.A.) a corto periodo (14 Hz). Per l'elaborazione e l'interpretazione tomografica è stato utilizzato il programma "Rayfract" sviluppato dalla Intelligent Resources Inc. (Canada), che utilizza come modello di calcolo il WET Tomography processing.



DESCRIZIONE DELLA METODOLOGIA

La prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura del tempo impiegato dalla perturbazione elastica indotta nel terreno, a percorrere la distanza tra sorgente e geofoni. La velocità di propagazione dell'onda longitudinale rifratta dipende dalle caratteristiche elastiche e dalla conformazione dei terreni attraversati. Ne risulta che la relazione velocità dell'onda e distanza sorgente – geofono (dromocrona) consente, applicando degli algoritmi, di risalire agli spessori degli strati del sottosuolo con caratteristiche elastiche differenti e crescenti con l'aumentare della profondità.

Le procedure di inversione rientranti nella famiglia delle tomografie sono volte a fornire un'immagine dettagliata della distribuzione all'interno della terra di un parametro fisico riconducibile alle misure effettuate. Nel caso della tomografia sismica si otterrà un'immagine relativa alla velocità delle onde sismiche.

L'esecuzione della prova sismica è simile alla metodologia impiegata per la sismica a rifrazione. La differenza è nel numero di battute necessarie; infatti, per risolvere i complicati calcoli iterativi che sono nascosti dietro il metodo tomografico è necessario compiere almeno una battuta ogni 6 geofoni, a differenza della sismica a rifrazione che al limite consente addirittura l'interpretazione con una sola battuta.

È comunque un'indagine indiretta non invasiva e veloce da eseguire, per cui è adatta per le prime fasi di progettazione per definire le caratteristiche del problema geotecnico.

La tomografia sismica consente di ottenere un'immagine dettagliata del sottosuolo superando in parte i limiti della sismica a rifrazione tradizionale. Quest'ultima tecnica, infatti, non consente di individuare forti variazioni laterali di velocità, risente in modo catastrofico delle inversioni di velocità, la presenza di gradini viene male interpretata. La tomografia sismica consente di superare questi problemi.

Si presta a individuare i sistemi di fratture nel substrato, a individuare la presenza di oggetti sepolti (cunicoli, fondazioni, vasche), a delimitare il volume dei corpi di frana o di discariche.



Ovviamente è necessario che esista una differenza di velocità tra l'oggetto della ricerca e ciò che lo circonda.

TIPICHE VELOCITÀ DELLE VP IN FUNZIONE DEL LITOTIPO

<i>Materiale terrigeno</i>	<i>Velocità minima (m/s)</i>	<i>Velocità massima (m/s)</i>
Alluvioni	300	600
Argilla	1000	2500
Argilla sabbiosa	600	2600
Ghiaia	750	1000
Sabbia siltosa	600	1900
Sabbia asciutta	200	1000
Sabbia satura	600	2300
Diorite	5800	6600
Graniti	5500	6100
Basalti	6500	7200

CONFRONTO SHOT BREAK PRIMI ARRIVI E DROMOCRONE

Il software Rayfract è basato sul modello di calcolo WET (Wavepath eikonal travelttime) che consente di ottenere sezioni tomografiche ad alta risoluzione in terreni topograficamente irregolari e substrati con morfologia complessa caratterizzati da variazioni laterali di velocità.

Il WET Tomography inversion è un modello di calcolo che consente di ricostruire un modello di velocità del primo sottosuolo ad alta definizione. Il modello di calcolo consente un'ottimizzazione non lineare dei tempi di arrivo dei travel-time delle onde sismiche dirette e rifratte registrate.

Il processo di calcolo è basato sull'elaborazioni e sviluppo delle seguenti fasi:

1. Ricostruzione del gradiente di velocità (stratigrafie di velocità sismica) attraverso la tecnica di inversione Delta-t-V, con la quale si ottengono dei profili 1D "profondità-velocità" dai dati di travel-time. La tecnica di inversione Delta-t-V permette di ricostruire con cadenza pari alla metà della cadenza dei geofoni (CMP = Common Mid Point) le successioni di velocità compatibili con l'andamento di tutte le possibili dromocrone nei punti intermedi tra punto di tiro e geofono. Dal modello ricostruito come successione di stratigrafie di resistività viene elaborato un modello ad elementi finiti di piccolissime dimensioni che può già rappresentare un attendibile modello del sottosuolo. Tuttavia questo rappresenta una prima approssimazione alla soluzione.
2. Elaborazione dell'inversione tomografica, in maniera iterativa, del modello Delta-t-V mediante la tecnica 2D WET (Wavepath Eikonal Traveltime). La teoria in proposito basa i modelli tomografici sulla modellizzazione del percorso di un fascio di raggi per ogni primo arrivo, contrariamente a quanto previsto con la tomografia convenzionale basata sulla modellizzazione del percorso di un raggio sismico per ogni primo arrivo. In pratica si effettua il calcolo delle differenze dei tempi di arrivo dai vari punti di tiro ai vari geofoni, tra i valori sperimentali misurati nei sismogrammi ed i tempi calcolati sul modello di partenza. In base alle differenze riscontrate, per ciascun percorso delle onde sismiche, si apportano modifiche, in aumento o in diminuzione, delle velocità che caratterizzano i vari elementi che sono stati interessati dal passaggio del fronte d'onda considerato. Ad ogni iterazione, dopo avere apportato le modifiche alle velocità dei vari elementi, il nuovo modello viene sottoposto



ad una operazione di smoothing che porta ad una migliore omogeneità dei valori di velocità entro aree di dimensioni maggiori. In genere sono sufficienti da 10 a 20 iterazioni per giungere ad un modello che porta a scarti medi tra i tempi (Traveltime) dei vari percorsi dell'ordine di qualche millisecondo (Schuster & Quintus-Bosz, 1999).

RAPPRESENTAZIONE DEI RISULTATI

Il profilo sismico è stato eseguito utilizzando 24 geofoni con interdistanza di 3 m, i punti di energizzazione sono stati 6, di cui due esterni, distribuiti simmetricamente rispetto al centro dello stendimento.

La sezione di campagna investigata con la sismica a rifrazione viene rappresentata mediante "sismostrati" sulla base delle velocità della V_p registrate.

I risultati vengono graficamente rappresentati con una sezione in cui le diverse scale cromatiche indicano le diverse velocità delle onde V_p misurate, con una certa soluzione di continuità, differentemente dalla rappresentazione con il metodo GRM, dove gli stacchi tra un sismostrato e l'altro sono bruschi e repentini.

Per poter meglio visualizzare la stratigrafia ottenuta viene utilizzata una scala cromatica, con colori che passando dall'azzurro scuro, al verde fino al giallo-rosso, rappresentano velocità delle V_p (in m/s), via via sempre più elevate.

Ubicazione in coordinate UTM WGS84 dello stendimento geoelettrico

<i>Punto</i>	<i>Coordinate Est (m)</i>	<i>Coordinate Nord (m)</i>
Inizio	478 507	4 392 686
fine	478 526	4 392 620

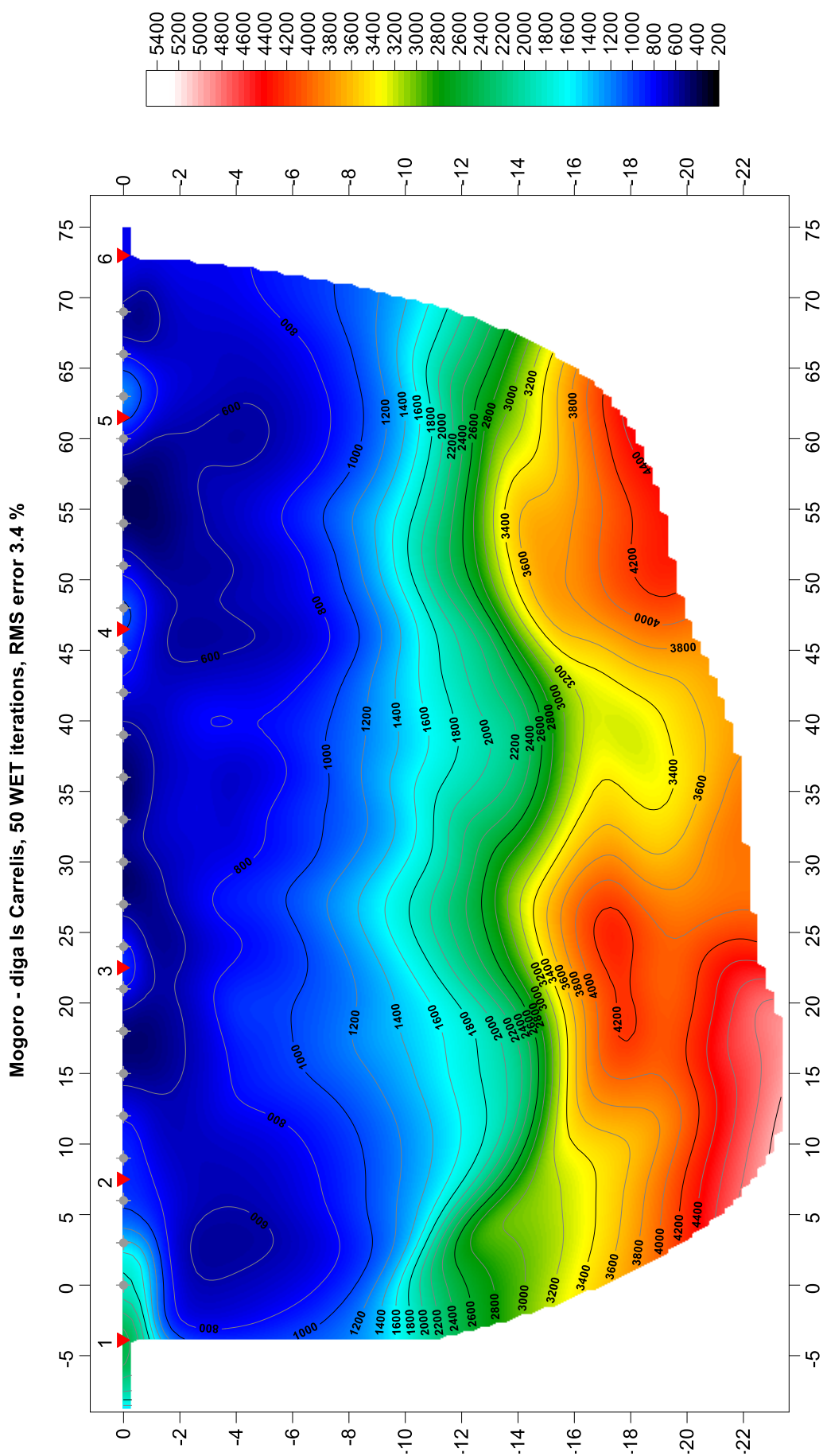
ANALISI DELLE SEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

L'indagine sismica ha individuato un primo livello piuttosto spesso e omogeneo costituito da terre mediamente a molto addensate con $500 \text{ m/s} < V_p < 1000 \text{ m/s}$, che individua il corpo della diga vero e proprio.

Oltre gli 8 m di profondità la velocità della V_p cresce repentinamente, passando in pochi metri da circa 1200 m/s a circa 2000 m/s oltre i 12 m di profondità. Le V_p con velocità comprese tra 1000 m/s e circa 2000 m/s individuano un substrato lapideo piuttosto alterato e fratturato. Mentre a partire dai 16 m di profondità si rilevano delle $V_p > 3000 \text{ m/s}$, che individuano un substrato roccioso piuttosto massivo, arrivando a misurare V_p massime di circa 4800 m/s.



SEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE





INDAGINE SISMICA CON ONDE DI SUPERFICIE MASW

La necessità dettata dalle NTC2018 di fornire una solida stima della velocità di propagazione delle onde S nel sottosuolo ha dato un forte slancio alla diffusione di tecniche basate sull'analisi della dispersione delle onde di superficie (Rayleigh e Love). La dispersione rappresenta una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. In un mezzo stratificato le varie componenti (lunghezza d'onda, quindi frequenza $\lambda = v/f$ del segnale sismico si propagano ad una velocità diversa in funzione delle caratteristiche del mezzo. Le componenti a frequenza minore (lunghezza d'onda maggiore) penetrano più in profondità e sono quindi influenzate dagli strati più profondi rispetto a quelle a frequenza maggiore (lunghezza d'onda minore) che risentono delle proprietà fisiche dei livelli superficiali, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

METODOLOGIA MASW

La tecnica MASW consente di misurare la velocità delle onde di taglio V_s sfruttando il carattere dispersivo delle onde di Rayleigh quando queste si propagano in un mezzo stratificato.

La dispersione consiste nella variazione della velocità di fase a diverse frequenze, con l'aumento della lunghezza d'onda (abbassamento di frequenza) la profondità coinvolta dalla propagazione dell'onda è via via maggiore.

È quindi possibile, impiegando onde di un certo intervallo di frequenza, caratterizzare le proprietà acustiche dei terreni sino ad una certa profondità. Nella maggior parte delle indagini sismiche per le quali si utilizzano le onde compressive, più di due terzi dell'energia sismica totale generata viene trasmessa nella forma di onde di Rayleigh, la componente principale delle onde superficiali.

Ipotizzando una variazione di velocità dei terreni in senso verticale, ciascuna componente di frequenza dell'onda superficiale ha una diversa velocità di propagazione (chiamata velocità di fase) che, a sua volta, corrisponde ad una diversa lunghezza d'onda per ciascuna frequenza che si propaga. Questa proprietà si chiama dispersione.

Sebbene le onde superficiali siano considerate rumore per le indagini sismiche che utilizzano le onde di corpo (riflessione e rifrazione), la loro proprietà dispersiva può essere utilizzata per studiare le proprietà elastiche dei terreni superficiali.

La costruzione di un profilo verticale di velocità delle onde di taglio (V_s), ottenuto dall'analisi delle onde piane della modalità fondamentale delle onde di Rayleigh è una delle pratiche più comuni per utilizzare le proprietà dispersive delle onde superficiali.

Questo tipo di analisi fornisce i parametri fondamentali comunemente utilizzati per valutare la rigidità superficiale, una proprietà critica per molti studi geotecnici.



L'intero processo comprende tre passi successivi: L'acquisizione delle onde superficiali (ground roll), la costruzione di una curva di dispersione (il grafico della velocità di fase rispetto alla frequenza) e l'inversione della curva di dispersione per ottenere il profilo verticale delle Vs.

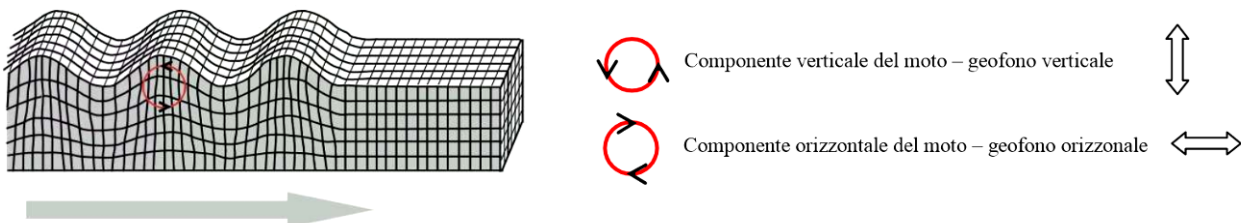
Il metodo si sviluppa attraverso la determinazione delle proprietà dispersive del mezzo individuabili dall'analisi dello spettro di velocità dei dati. Il range di frequenza si sviluppa comunemente tra i 5 Hz e i 70Hz, fornendo informazioni sino a profondità di circa 30 m a seconda della rigidità del suolo: la profondità massima di penetrazione è determinata dalla relazione fra velocità di propagazione dell'onda e più bassa frequenza identificabile.

Questa tipologia di prospezione si realizza con uno stendimento sismico costituito da 12/24 o più geofoni allineati a distanza intergeofonica variabile tipicamente fra 1 e 5 m (la lunghezza dello stendimento incide sulla focalizzazione del segnale nello spettro di velocità) che registrano le onde sismiche generate in corrispondenza di X punti di energizzazione effettuati tipicamente ad una distanza compresa fra 2 m e 20 m dal primo geofono.

L'obiettivo della registrazione è quindi l'individuazione del treno di onde superficiali (Rayleigh), che a causa della stratificazione del mezzo subisce una dispersione le cui modalità sono direttamente correlate alla velocità delle onde di taglio S.

L'acquisizione delle onde di Rayleigh può essere fatta mediante geofoni verticali (come nel nostro caso), oppure mediante geofoni orizzontali con asse posto parallelo (radiale) allo stendimento (in entrambi i casi si utilizza una sorgente verticale - piastra-martello).

Rayleigh Wave



FASI DI ELABORAZIONE

L'analisi dei dati acquisiti avviene attraverso le seguenti fasi:

1. Calcolo dello spettro di velocità; 2. Individuazione del modo fondamentale e degli eventuali superiori; 3. Calcolo della curva di dispersione mediante modellazione diretta, cioè attribuzione degli spessori e delle velocità relative, sulla base di dati riguardanti il sito acquisiti precedentemente tramite indagini dirette o bibliografia. In alternativa picking della curva di dispersione, cioè selezione dei punti che si ritengono appartenere ad un determinato modo; 4. Inversione della curva di dispersione e conseguente individuazione del profilo di velocità Vs.

Gli spettri di velocità risultano dominati dal modo fondamentale delle onde di Rayleigh.



Nella Tabella e nelle Figure sottostanti vengono riportati: l'andamento del profilo di velocità; gli spessori; le relative velocità V_s (dalle onde di Rayleigh) e la densità stimati, ricordando che, come in tutti i metodi geofisici, può essere ottenuta solo una stima del modello sismostratigrafico a causa del problema della non univocità.

La rappresentazione grafica dei risultati dell'indagine Masw viene rappresentata attraverso i diagrammi dello spettro di dispersione, il quale indica come le onde di superficie si disperdono nel terreno individuando anche i "modi superiori", dovuti generalmente alla presenza di discontinuità stratigrafiche.

L'andamento stratigrafico delle V_s viene rappresentato con un digramma dove sono indicate alle diverse profondità investigate le rispettive velocità V_s a cui si sovrappone l'andamento della curva di dispersione data da una secessione di pallini verdi.

GEOMETRIA DELLO STENDIMENTO SISMICO

- Disposizione geofoni: n° 24 geofoni disposti con intervallo di 3.0 m
- Punti di energizzazione: n° 2 battute di energizzazione a 4 m di distanza dal primo e dall'ultimo geofono
- Frequenza di campionamento: 1 ms
- Durata di acquisizione: 1.5 s

RIGIDITÀ SISMICA (R)

La rigidità sismica è un parametro legato all'amplificazione sismica locale; tanto più alto risulta R tanto minore sarà l'incidenza del danno dovuto al sisma;

$$R = \gamma \cdot V_s$$

- γ = peso di volume naturale
- V_s = Velocità di taglio.

FREQUENZA FONDAMENTALE DI NAKAMURA (F_0)

$$F_o = \frac{V_s}{4 \cdot H}$$

In cui:

- H = spessore dello strato.
- Velocità delle onde longitudinali (V_s)

CATEGORIE DEL SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE

Nei paragrafi che si riportano nel seguito sono riassunti i dati medi principali desunti dall'indagine. Nel calcolo della "Velocità equivalente" V_{seq} si è tenuto conto di tutti gli strati rilevati nei profili completi riportati in precedenza. La V_{seq}



rappresenta la media ponderata della distribuzione delle velocità di taglio per una profondità H sotto il piano di fondazione e si ottiene applicando la seguente formula:

$$V_{s_{eq}} = \frac{H}{\sum_{strato=1}^N \frac{h_{(strato)}}{V_{s_{(strato)}}}}$$

Dove N è il numero di strati individuabili nei primi metri di suolo, ciascuno caratterizzato dallo spessore $h_{(strato)}$ e dalla velocità delle onde S $V_{s_{(strato)}}$.

Per H si intende la profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il parametro $V_{s_{eq}}$ consente di stabilire la classe di suolo come stabilito alle NTC del 2018 e sono riportate nella tabella che segue.

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO DI FONDAZIONE SECONDO LE NTC DEL 2018

CATEGORIA	DESCRIZIONE
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30m.



RISULTATI DELLE INDAGINI SISMICHE

L'analisi dei profili sismici per il calcolo delle Vs equivalenti nelle due sponde del torrente è stata effettuata utilizzando un modello composto da 9 sismostrati, di seguito rappresentati in tabella con delle indicazioni di massima della stratigrafia riscontrata.

Stratigrafia Vs MASW 01								
Strati	Profondità (m)	Spessore (m)	Descrizione	γ_1 (kN/m ³)	Vs (m/s)	R (kPa)	F (Hz)	T (s)
1	1,7	1,7	Corpo diga	18,7	355	6626	151	0,019
2	3,7	2,1		18,8	365	6860	192	0,023
3	6,3	2,5		19,2	395	7572	247	0,025
4	9,2	2,9	Basamento lapideo alterato	19,8	449	8887	326	0,026
5	12,5	3,3	Basamento lapideo	20,9	555	11583	458	0,024
6	16,2	3,7		22,1	694	15317	642	0,021
7	20,4	4,2	Basamento lapideo massivo	23,1	826	19041	867	0,020
8	25	4,6		23,3	865	20172	995	0,021
9	-	-		23,3	865	20172	-	-

L'indagine sismica MASW ha riscontrato la presenza di un substrato rigido con Vs>800 m/s entro i primi 30 m di profondità; pertanto, la velocità della Vs equivalente è stata calcolata utilizzando le Vs misurate fino alla profondità del basamento rigido, coerentemente alle prescrizioni delle NTC 2018.

La Vs equivalente misurata a partire dal coronamento della diga è stata pari a **468 m/s**, a cui corrisponde una categoria di sottosuolo di tipo **B**.

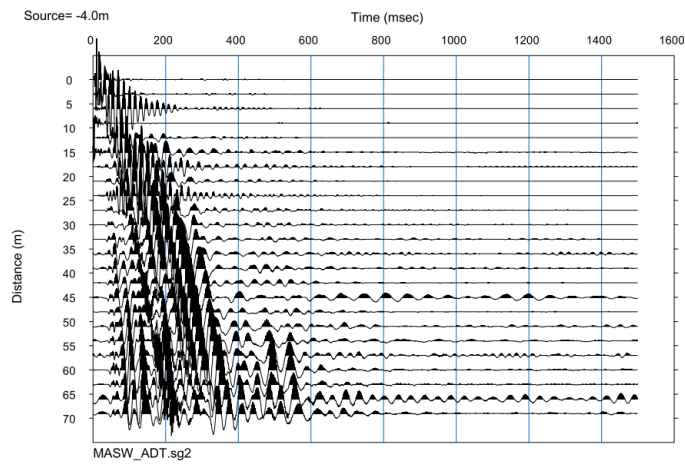
La Vs equivalente misurata a partire dal presunto livello di imposta della diga sul substrato di sedime è stata pari a **510 m/s**, a cui corrisponde una categoria di sottosuolo sempre di tipo **B**.

Resta sempre in capo al progettista l'utilizzo della categoria di sottosuolo di riferimento da utilizzare in funzione delle scelte progettuali.

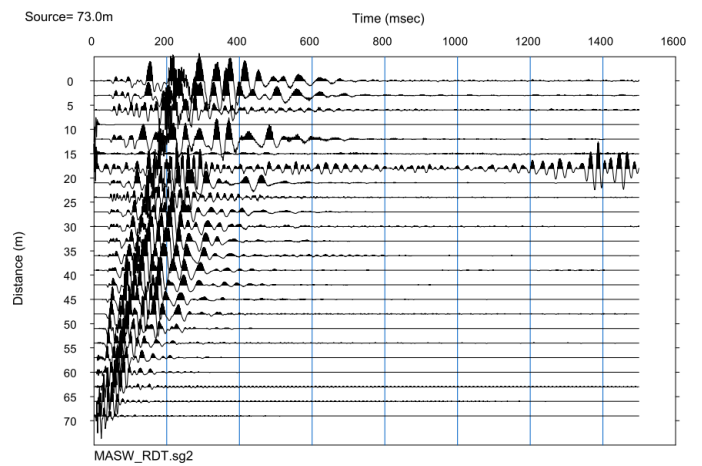
¹ Keceli (2012) $\gamma = 4,3 \cdot Vs^{0,25}$



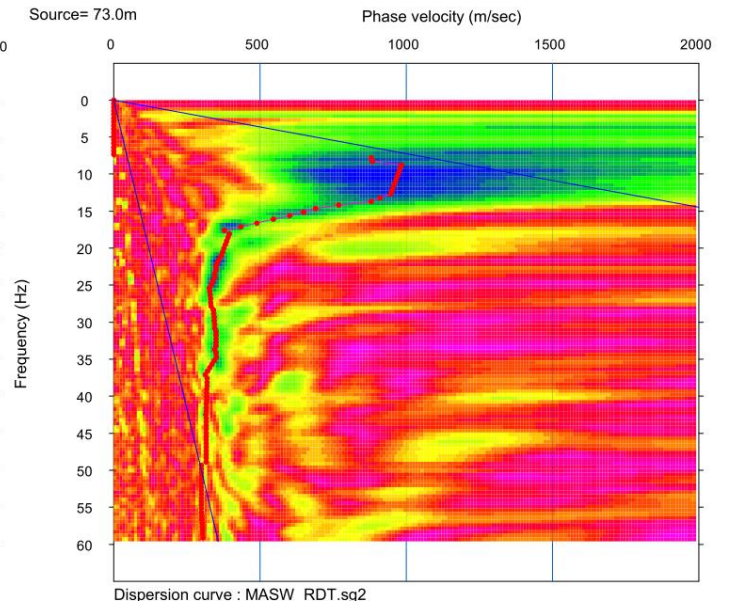
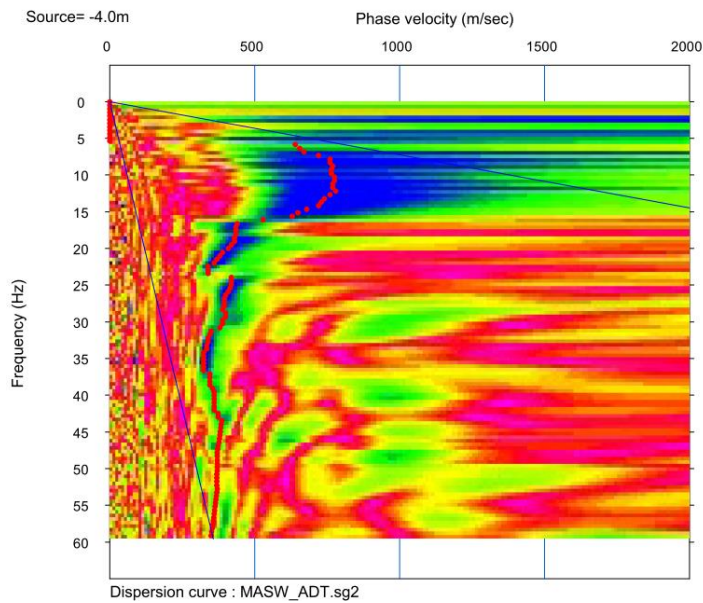
Sismogramma MASW ADT

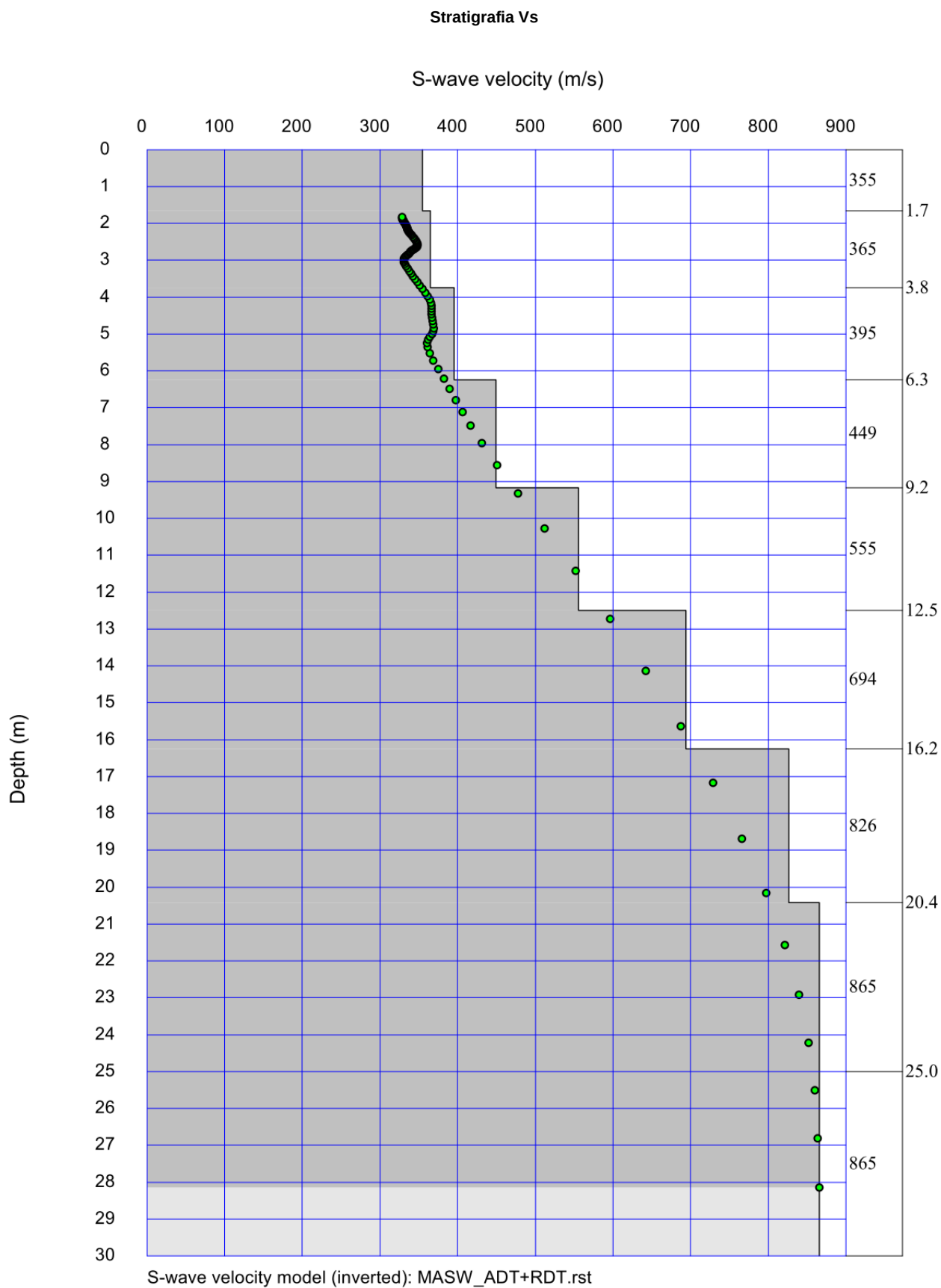


Sismogramma MASW RDT



Spettro di dispersione MASW ADT







CORRELAZIONI GEOTECNICHE

In via assolutamente preliminare e puramente indicativa è possibile utilizzare i valori di velocità delle Vs per estrapolare dei parametri geotecnici. Utili in una prima fase di dimensionamento e verifica delle opere².

CORRELAZIONE Φ -VS

La correlazione per il calcolo dell'angolo di resistenza al taglio direttamente in funzione di Vs, valore normalizzato per la pressione litostatica, è ripresa da Uzielli et al. (2013) e Mayne (2014) e consente di definire il range dei valori di picco:

$$\text{limite superiore:} \quad \phi = 3,9 \cdot Vs^{0,44}$$

$$\text{limite inferiore:} \quad \phi = 3,9 \cdot (Vs^{0,44}) - 6,2$$

in via cautelativa si suggerisce l'utilizzo del limite inferiore.

CORRELAZIONE CU-VS

La correlazione per il calcolo della coesione non drenata (Cu in kPa) può essere calcolata con la formula di Dickenson (1990) valida per argille tenere:

$$Cu = (Vs/23)^{1/0.475}$$

PORTANZA

La capacità portante dei terreni di fondazione (q_{ult} in kPa) in funzione di Vs si può calcolare secondo Keceli (2012)

$$q_{ult} = 0,43 \cdot Vs^{1,25}$$

il carico ammissibile si stima in base ad un fattore di sicurezza Fs applicato nella formula precedente che porta:

$$q_{amm} = 0,123 \cdot Vs^{1,25} \quad \text{per } Vs < 400 \text{ m/s}$$

$$q_{amm} = 0,143 \cdot Vs^{1,25} \quad 400 \text{ m/s} < Vs < 700 \text{ m/s}$$

² Tratto da "Stima dei parametri geotecnici in geofisica applicata" di Roccaforte-Cucinotta – Ed. Dario Flaccovio



MASW 1

P [m]	Vs [m/s]	$\varphi_{\min}$ [°]	$\varphi_{\max}$ [°]	Cu kPa	q_{ult} [kN/m ²]	q_{amm} [kN/m ²]
1.7	355	45.5	51.7	318	663	190
3.7	365	46.1	52.3	337	686	228
6.2	395	47.9	54.1	398	757	252
9.2	449	51.1	57.3	521	889	296
12.5	555	56.7	62.9	814	1158	385
16.2	694	63.2	69.4	1303	1532	509
20.4	826	68.7	74.9	1880	1904	633
25	865	70.2	76.4	2072	2017	671
-	865	70.2	76.4	2072	2017	671

ESECUZIONE INDAGINE SISMICA



Villacidro, 12 dicembre 2022

DOTT. GEOL. GIANCARLO CARBONI
ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA N° 497



Giancarlo Carboni