



**POLITECNICO
DI TORINO**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica



Interreg
ALCOTRA

Fonds européen de développement régional
Fondo europeo di sviluppo regionale



Deliverable D-3.2.1

Azione B & C

Relazione sull'analisi degli incidenti e dei rischi

Azione B & C: “Analisi dei rischi: sismico e caduta massi”

RESBA 2018-2020

Prof. Bernardino Chiaia, Politecnico di Torino

Prof. Sebastiano Foti, Politecnico di Torino

Prof. Renato Maria Cosentini, Politecnico di Torino

Prof. Valerio De Biagi, Politecnico di Torino

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	3
2. VULNERABILITÀ SISMICA DELLE PICCOLE E MEDIE DIGHE IN MATERIALE SCIOLTO	3
2.1. Indagini per la caratterizzazione degli sbarramenti per analisi di vulnerabilità sismica.....	3
2.1.1. Diga di Arignano (TO).....	5
2.1.2. Diga “La Grengia” – Envie (CN)	14
2.1.3. Diga Envie - Revello (CN)	18
2.1.4. Diga Niella Tanaro – Briaglia (CN).....	22
2.2. Analisi avanzate per la valutazione della vulnerabilità sismica degli sbarramenti	30
2.2.1. Definizione degli accelerogrammi	31
2.2.1. Definizione dei modelli numerici	33
2.2.1. Analisi dei dati	36
2.3. Relazioni pseudo-empiriche per la valutazione della risposta sismica degli sbarramenti.....	39
3. VULNERABILITÀ DEGLI SBARRAMENTI RISPETTO ALLA CADUTA MASSI	44
3.1. Il vettore rischio.....	45
4. BIBLIOGRAFIA	49

1. INTRODUZIONE

Gli sbarramenti nell'area transfrontaliera Franco-Italiana, malgrado le loro modeste dimensioni, presentano rischi notevoli per le popolazioni e i beni presenti a valle (aree urbanizzate e a forte frequentazione turistica), in conseguenza ai possibili scenari di collasso con un elevato potere distruttivo. Le dighe e gli sbarramenti alpini e di media montagna sono soggetti a rischi specifici che richiedono un'attenta valutazione delle vulnerabilità rispetto ai principali rischi naturali che derivano dalla conformazione propria di queste aree. Nell'ambito del progetto ReSba, tra gli studi dei pericoli naturali specifici potenzialmente interagenti con gli sbarramenti nell'area Franco-Italiana, una ampia azione è stata condotta nei confronti della vulnerabilità sismica delle dighe in materiale sciolto e della vulnerabilità degli sbarramenti rispetto alla caduta massi.

2. VULNERABILITÀ SISMICA DELLE PICCOLE E MEDIE DIGHE IN MATERIALE SCIOLTO

Si definiscono “dighe di dimensioni contenute” (piccole e medie dighe) quelle opere di sbarramento caratterizzate da una altezza non superiore ai 15 m ed un volume massimo di invaso inferiore a 10^6 m^3 (NTD, 2014). La loro progettazione e realizzazione è in genere eseguita dai proprietari con dotazioni tecnologiche e mezzi economici limitati, pertanto la sicurezza di queste strutture può risultare limitata soprattutto nei confronti di eventuali eventi sismici. Nell'ambito del progetto precedente RISBA (2015) era stata formulata una procedura semplificata, definita di livello zero, basata su informazioni reperibili da sopralluoghi o dalle poche documentazioni tecniche esistenti per una preliminare valutazione della vulnerabilità sismica di tali opere e poter quindi evidenziare le criticità che richiedono valutazioni più puntuali e dettagliate (Cosentini et al., 2020). Nell'ambito del progetto ReSba sono state invece condotte delle analisi avanzate su alcuni invasi per poter formulare uno strumento semplificato per la valutazione della prestazione sismica dei corpi diga da utilizzare nelle verifiche preliminari di un progetto di lavoro o nella diagnosi rapida della prestazione sismica di una struttura esistente.

Le analisi sono state precedute da una campagna di indagine condotta sugli sbarramenti oggetto dello studio specifico, al fine di poter caratterizzare nel dettaglio i terreni del corpo diga e di fondazione. Le esperienze definite su alcuni casi studio hanno consentito di definire alcune linee guida tecniche da adottare per la valutazione della vulnerabilità sismica delle opere di sbarramento.

2.1. Indagini per la caratterizzazione degli sbarramenti per analisi di vulnerabilità sismica

La valutazione della vulnerabilità sismica degli sbarramenti può essere eseguita mediante metodi di analisi molto differenti con gradi di complessità crescente. In linea generale si distinguono tra metodi semplificati (pseudo-statici), in cui l'azione sismica è schematizzata come forza statica equivalente, e metodi dinamici, in cui l'azione sismica è rappresentata da una storia temporale dell'accelerazione. Questi ultimi metodi, a loro

volta, si distinguono in semplificati ed avanzati. Una descrizione più dettagliata dei diversi metodi è riportato in Lanzo (2018). La possibilità di poter adottare metodi più o meno complessi, devira essenzialmente dal livello di conoscenza dell'opera. È evidente che le analisi più complesse, basate generalmente su metodi numerici e con l'adozione di modelli costitutivi avanzati per i terreni, consentono di ottenere una risposta più realistica dell'opera sotto le azioni simiche, ma nel contempo richiedono un elevato livello di conoscenza della struttura in termini geometrici e di caratterizzazione meccanica dei terreni che costituiscono la fondazione ed il corpo diga.

Nell'ambito del progetto ReSba, sono state individuate alcuni casi studio sui quali sono state preventivate e condotte opportune indagini di sito e di laboratorio, atte a caratterizzare i terreni e poter quindi definire opportuni modelli su cui eseguire le analisi dinamiche avanzate. Gli sbarramenti selezionati sono: la diga "la Grengia", sita nel comune di Envie, una diga sita tra i comuni di Envie e Revello, la diga di Niella Tanaro-Briaglia, sita nel comune di Briaglia, tutte nella provincia di Cuneo; la diga di Arignano, sita nel comune di Arignano in provincia di Torino. Per alcune delle dighe è stato possibile analizzare le informazioni disponibili da alcune documentazioni di interventi precedenti, per cui le indagini eseguite nell'ambito del progetto ReSba sono state modulate per ciascuna opera allo scopo di integrare i dati esistenti.

Nella (Tabella 1) sono elencate le prove di sito che sono state eseguite per ciascuna delle suddette dighe. I risultati delle prove saranno dettagliate nel paragrafo successivo.

Tabella 1: Tipologie di prove in sito realizzate nelle dighe selezionate come casi studio

Diga	Prove
Arignano (TO)	Prove geofisiche <ul style="list-style-type: none"> MASW HVRS singola stazione AVA Streamer elettro-sismico
	Prove geognostiche <ul style="list-style-type: none"> SCPTU DMT
"La Grengia" Envie (CN)	Prove geofisiche <ul style="list-style-type: none"> MASW DH
	Prove geognostiche <ul style="list-style-type: none"> Sondaggio a carotaggio continuo (con prelievo di CI) SCPTU DMT
Envie - Revello (CN)	Prove geofisiche <ul style="list-style-type: none"> DH
	Prove geognostiche <ul style="list-style-type: none"> Sondaggio a carotaggio continuo (con prelievo di CI) SCPTU DMT
Niella – Briaglia Briaglia – Niella Tanaro (CN)	Prove geofisiche <ul style="list-style-type: none"> MASW HVRS singola stazione DH

	Prove geognostiche <ul style="list-style-type: none"> • Sondaggio a carotaggio continuo (con prelievo di CI) • SCPTU • DMT
MASW: Prova sismica attiva Multi-channel Analysis of Surface Wave; AVA: Prova sismica passiva Ambient Vibration Arrey; HVRS – Prova sismica passiva a singola stazione Horizontal to Vertical Spectral Ratio; DH: prova Down Hole; Sreamer elettro-sismico: prove geofisica combinata di resistività elettrica e simica attiva; SCPTU: prova penetrometrica statica con piezo-cono sismico; DMT: prova con dilatometro tipo Marchetti; CI: campione indisturbato	

2.1.1. Diga di Arignano (TO)

La diga di Arignano (Figura 1) è una delle opere di sbarramento selezionate con una adeguata documentazione esistente, ricca di informazioni utili e dati per la caratterizzazione dell'invaso. La diga è stata, infatti, oggetto di una precedente campagna di indagine nel 2004, a seguito della necessità di procedere alla messa in sicurezza dell'invaso mediante l'adeguamento degli organi di regolazione. Dalla documentazione esistente si evince che la diga fu realizzata nella seconda metà del XIX secolo nel bacino del Rio del Lago, che presenta una superficie di circa 14 km², per scopi irrigui e per la produzione di forza motrice a servizio di un vecchio mulino ormai non più funzionante. Il fronte di sbarramento, che ha uno sviluppo di circa 380 m, è costituito da un rilevato in terra a sezione trapezoidale, avente una larghezza al coronamento di 5 m e una altezza massima di poco più di 7 m.



Figura 1: Vista aerea (a sinistra) e panoramica (a destra) dell'invaso di Arignano

Nell'ambito della campagna di indagine del 2004, furono eseguiti 5 sondaggi a carotaggio continuo, 3 dei quali condotti a partire dal coronamento, durante i quali sono stati prelevati 8 campioni indisturbati, ed eseguite 8 prove SPT (Standard Penetration Test) e 4 prove LAFRANC a carico idraulico variabile. Sui campioni prelevati sono state condotte le seguenti prove di laboratorio: analisi granulometriche, determinazione dei limiti di Atterberg, prove di taglio diretto, prove triassiali di tipo non consolidate non drenate e prove edometriche.

I dati ottenuti dalla suddetta campagna di indagine sono stati attentamente studiati per definire i parametri utili alla modellazione dell'invaso e stabilire le prove da realizzare nella nuova campagna di indagine nell'ambito del progetto ReSba.

I principali risultati delle prove condotte nel 2004 sono qui di seguito riassunti. Nella Figura 2 sono riportate le ricostruzioni delle colonne stratigrafiche desunte dai sondaggi eseguiti a partire dal coronamento del corpo diga.

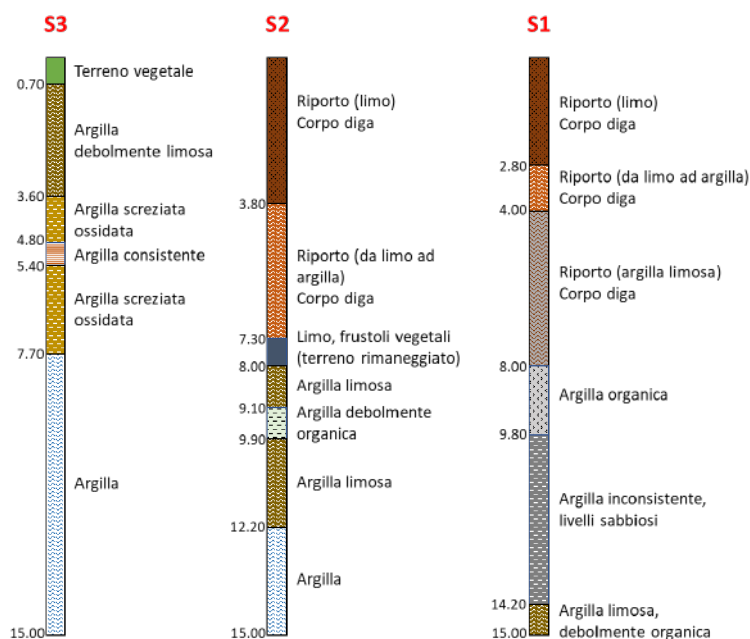


Figura 2: Colonne stratigrafiche dei sondaggi realizzati nel corpo diga nella campagna di indagine del 2004

Nelle Tabella 2 e Tabella 3 sono riportati rispettivamente i valori delle prove SPT e delle prove LAFRANC a carico idraulico variabile.

Tabella 2: Risultati delle Prove Penetrometriche Standard (SPT) condotte nelle indagini del 2004

Sondaggio	Profondità (m)	N _{SPT}
S1	4.00	5-7-8
	8.00	12-9-8
	12.00	1-1-2
S2	4.00	5-5-4
	8.00	6-8-10
	12.00	4-10-13
S3	3.00	5-12-13
	6.00	6-9-9

Tabella 3: Risultati delle prove di permeabilità in situ Lafranc condotte nelle indagini del 2004

Sondaggio	Profondità (m)	K (cm/s)
S1	4.00 ÷ 5.00	$5.21 \cdot 10^{-7}$
	8.00 ÷ 9.00	$9.70 \cdot 10^{-8}$
S2	4.00 ÷ 5.00	$3.34 \cdot 10^{-7}$
	8.00 ÷ 9.00	$1.46 \cdot 10^{-6}$

Di seguito si riportano invece i principali risultati delle prove di laboratorio che furono eseguiti su alcuni dei campioni prelevati (Tabella 4).

Tabella 4: Campioni indisturbati prelevati nella campagna di indagine del 2004

Sondaggio	Campione indisturbato	Profondità di prelievo (m)
S1	C1	3.50 ÷ 4.00
	C2	6.50 ÷ 7.00
	C3	11.00 ÷ 11.50
S2	C1	3.50 ÷ 4.00
	C2	6.50 ÷ 7.00
	C3	11.00 ÷ 11.50
S3	C1	3.50 ÷ 4.00
	C2	6.50 ÷ 7.00

La Figura 3 ripota l'analisi granulometriche e la classificazione dei campioni secondo la carta di plasticità di Casagrande.

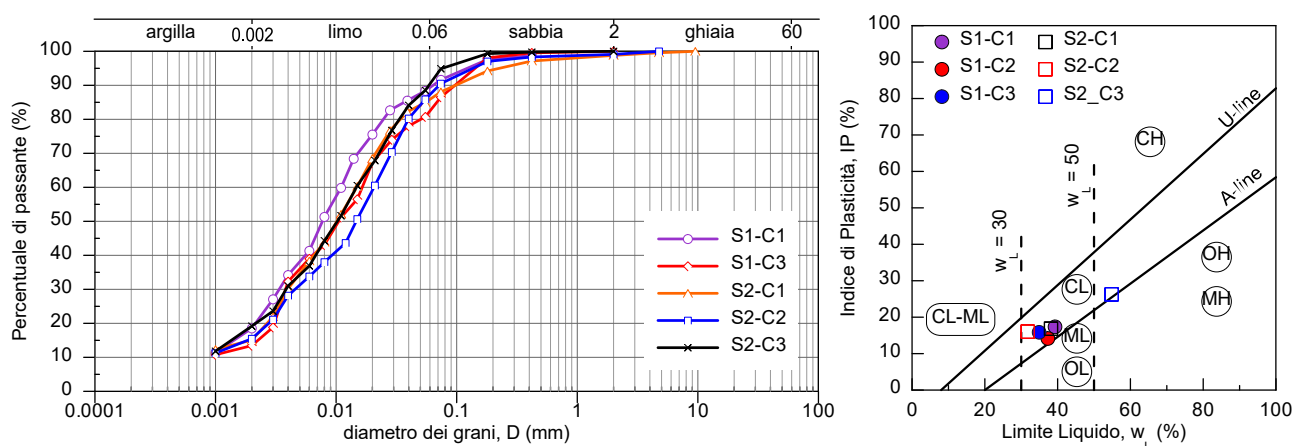


Figura 3: Curve granulometriche (a sinistra) e carta di plasticità di Casagrande dei campioni prelevati nei sondaggi S1 e S2

La Figura 4 mostra, invece, i risultati delle prove di taglio diretto eseguite sul campione S1 – C1 e S2 – C2.

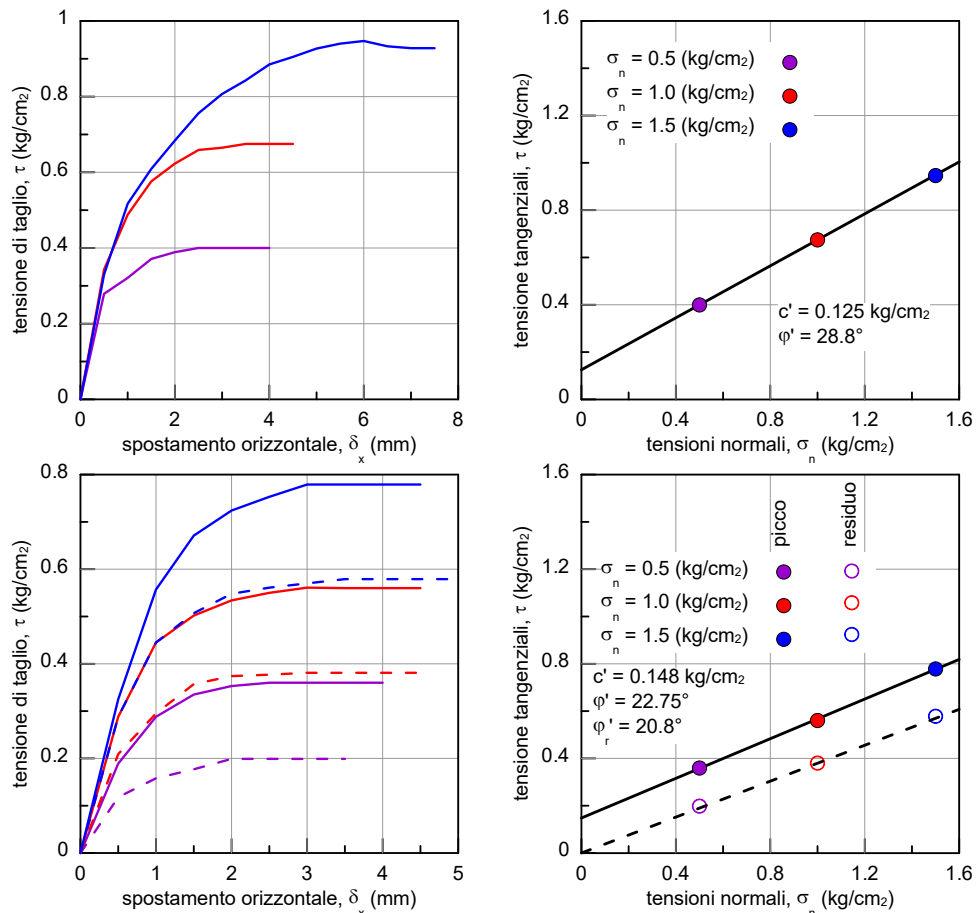
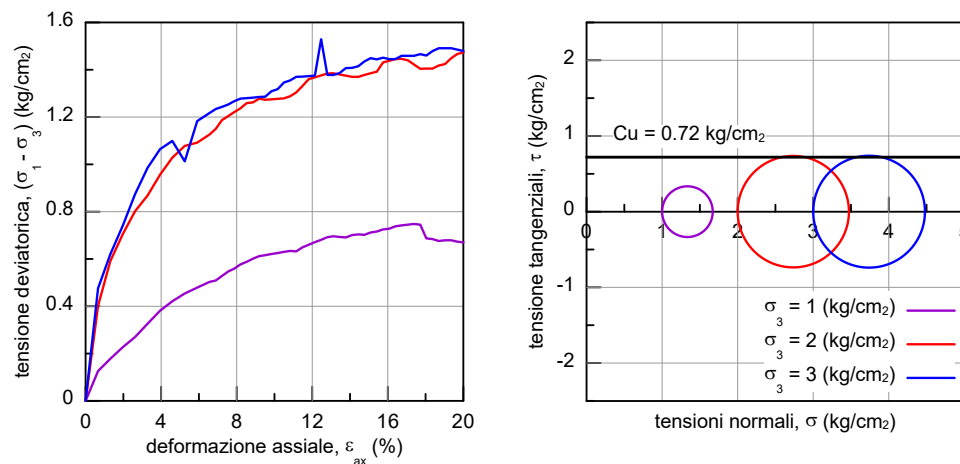


Figura 4: Risultati delle prove di taglio diretto, in termini di tensione di taglio – spostamento orizzontale (a sinistra) e involucro di rottura (a destra), per il campione S1 – C1 (in alto) e S2-C1 (in basso)

La Figura 5 riassume i risultati delle prove triassiali non consolidate non drenate condotte sui campioni S1 – C3 e S2 – C2.



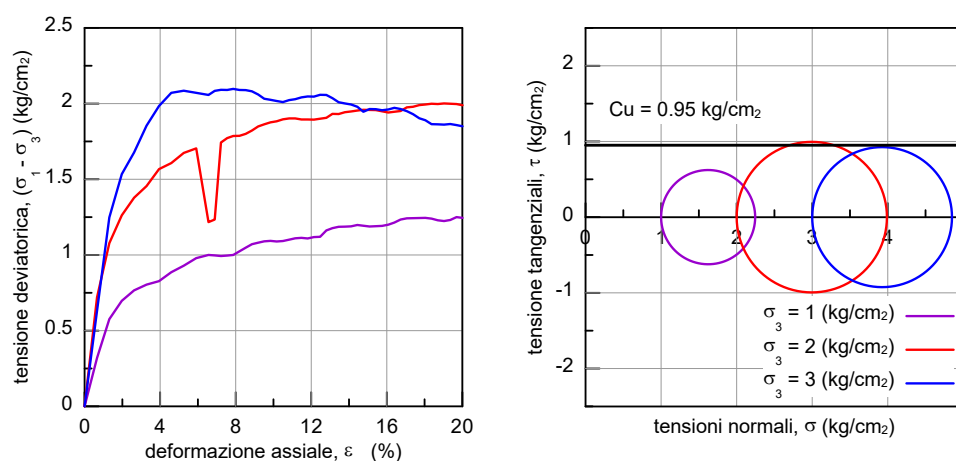


Figura 5: Risultati delle prove triassiali non consolidate non drenate in termini di deviatorico degli sforzi – deformazione assiale (a sinistra) e involucro di rottura nel piano di Mohr (a destra), per il campione S1 – C3 (in alto) e S2-C2 (in basso).

Infine, la Figura 6 riporta i dati delle prove edometriche.

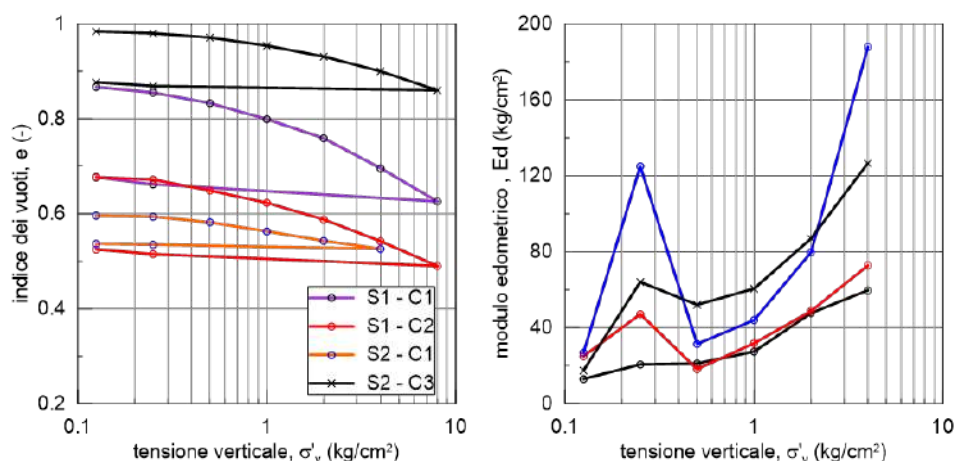


Figura 6: Risultati delle prove edometriche condotte sui campioni prelevati dai sondaggi S1 e S2, in termini di curva edometrica (a sinistra) e variazione del modulo edometrico in funzione della tensione verticale (a destra).

Nell'ambito del progetto ReSba sono state programmare ed eseguite le seguenti indagini a integrazione delle prove del 2004: tre prove MASW (multistation analysis of surface waves), due sul coronamento e una su una area a valle dello sbarramento, e due prove HVSr (horizontal-to-vertical spectral ratio) a singola stazione nelle medesime aree. Nell'area a valle del corpo diga, è stata eseguita anche una prova sismica passiva AVA (ambient vibration analysis) con un array di geofoni disposti secondo una configurazione 2D. Sul coronamento sono state eseguite inoltre 3 prove SCPTU con piezo-cono sismico e una prova DMT. Una quarta prova SCPTU con piezo-cono sismico è stata realizzata al piede del corpo diga. In fine, mediante la collaborazione con l'Università degli Studi di Torino e la società "Techgea Geophysics", è stato eseguita una ulteriore prova geofisica mediante una moderna tecnologia basata su uno "Streamer" elettrico – sismico (Comina et al., 2020).

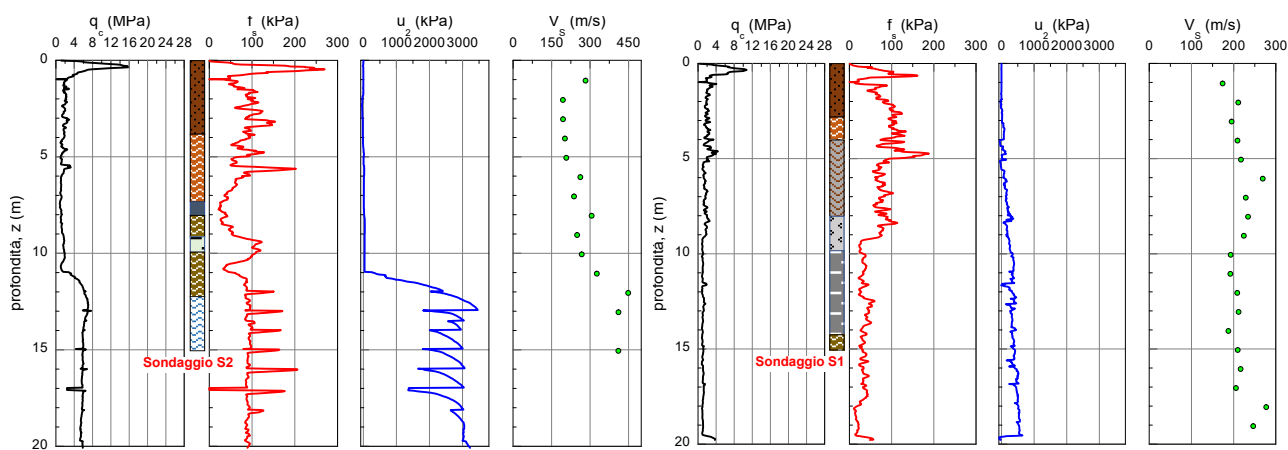
Nella Figura 7 sono indicate le posizioni delle singole prove. Alcune delle suddette prove sono state condotte in adiacenza alle prove realizzate durante la campagna d'indagine del 2004, come visibile dalla medesima figura, per definire le opportune corrispondenze dei dati.



Figura 7: Localizzazione delle prove previste nell'ambito della campagna di indagine del progetto ReSba

I risultati delle singole prove sono di seguito riassunti.

La Figura 8 mostra i profili delle misure ottenute durante le prove SCPTU1, 3 e 4. La Figura 9 riporta, invece, la misura della prova SCPTU 2 e i dati ottenuti dalla adiacente prova DMT.



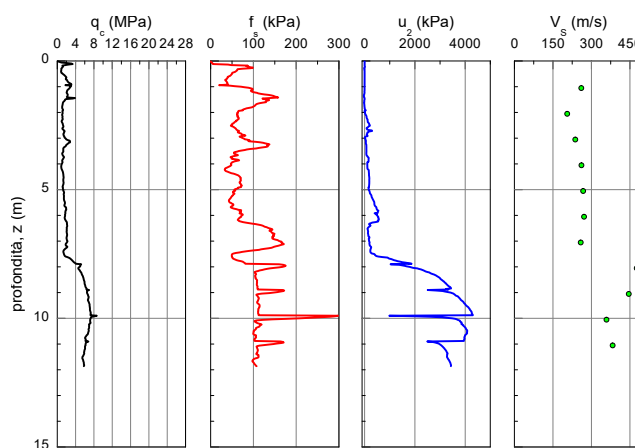


Figura 8: Risultati delle prove penetrometriche con piezo-cono sismico - SCPTU -1 (in alto a sinistra), SCPTU - 3 (in alto a destra), SCPTU - 4 (in basso).

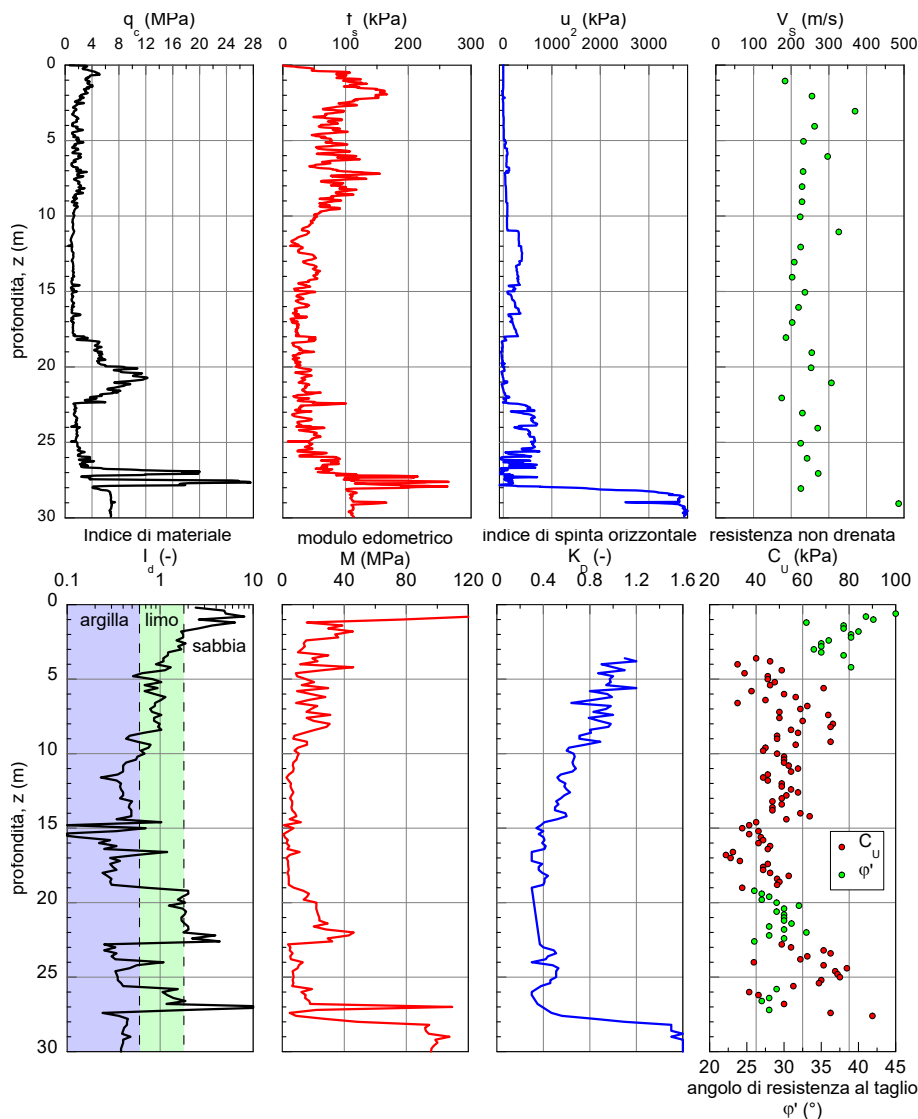


Figura 9: Risultati della prova penetrometrica SCPTU - 2 (in alto) e della prova dilatometrica DMT (in basso).

Nella Figura 10 si riportano i miglior profili di velocità, assieme al campione statistico degli intervalli di velocità, ottenuti mediante la interpretazione congiunta delle prove geofisiche MASW e HVRS condotte sul coronamento (a sinistra) e quelle condotte nell'area a valle dell'opera di sbarramento (a destra). In quest'ultimo caso la interpretazione è stata condotta aggiungendo anche le informazioni delle prove geofisiche passive AVA.

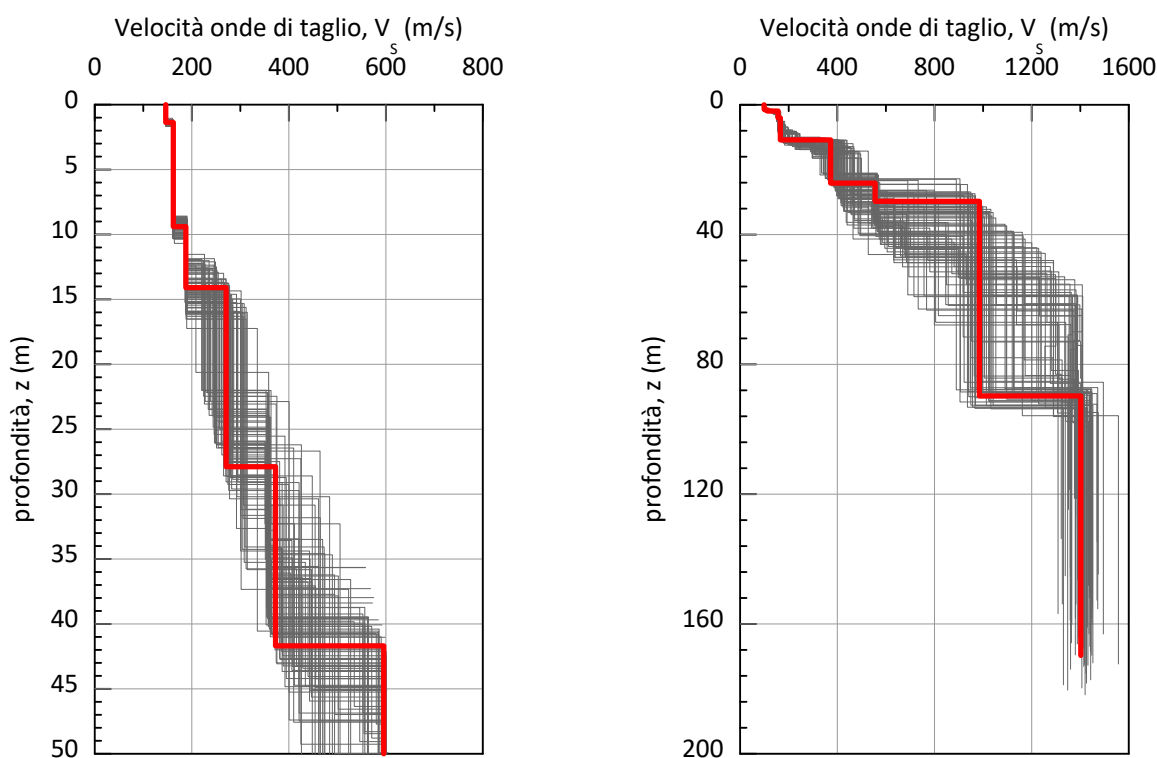
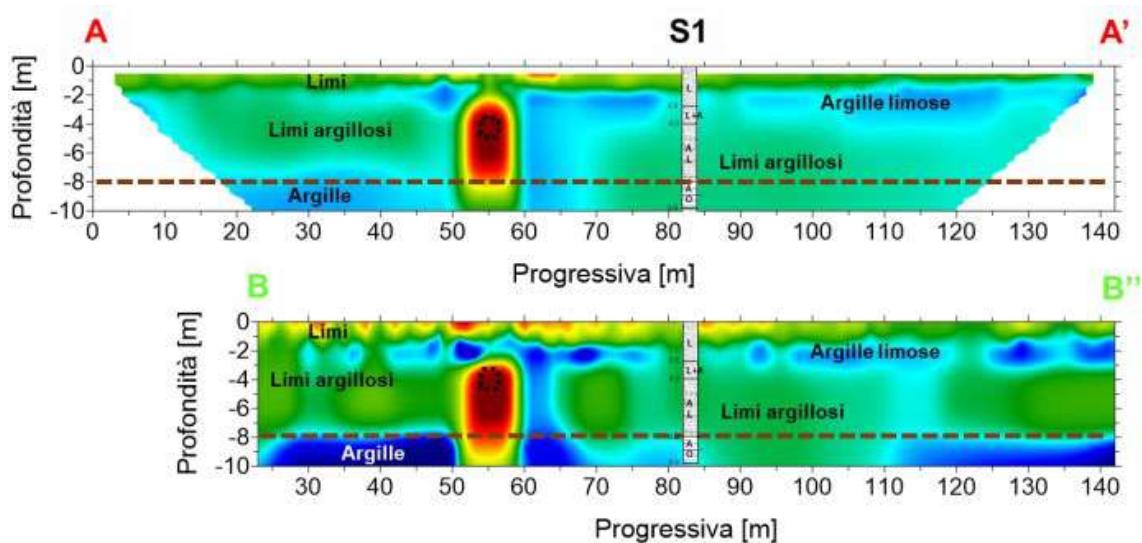


Figura 10: Profili delle velocità V_s valutate a partire dal coronamento (a sinistra) e dal piano campagna a valle del corpo diga (a destra).

Per ultimo le Figura 11 e Figura 12 mostrano i risultati ottenuti mediante lo streamer elettro-sismico in termini, rispettivamente, di modelli tomografici di resistività elettrica e velocità delle onde di taglio V_s .

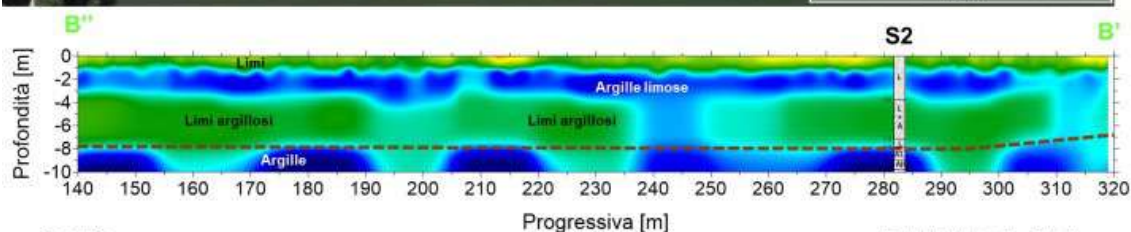
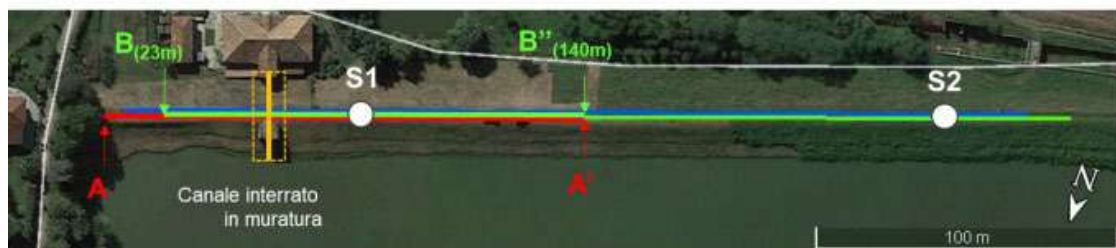
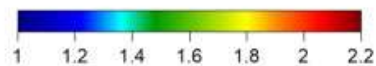
L'adozione di quest'ultima tecnica geofisica non distruttiva di prova, ha dimostrato di poter essere un valido approccio per il monitoraggio periodico delle opere di sbarramento in materiale sciolto. Le misure mediante lo Streamer elettrico-sismico sono rapide e a basso costo, pertanto possono essere ripetute nel tempo senza aggravii di spesa in modo da poter eventualmente individuare punti di criticità del corpo diga e adottare tempestivamente le dovute azioni di intervento.



Legenda

- A-A' ERT standard
B-B'' Streamer elettrico (progr. 23-140 m)
Base argine
Posizione canale interrato

Resistività elettrica [Log10(Ωm)]



Legenda

- B''-B' Streamer elettrico (progressive 140-320 m)
Base argine (p.c.)

Resistività elettrica [Log10(Ωm)]

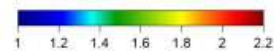


Figura 11: Modello tomografico di resistività elettrica (sezione A-A' - ERT standard; sezione B-B'' - ERT streamer progressive 23-140 m; sezione B''-B' - ERT streamer tra le progressive 140-320 m).

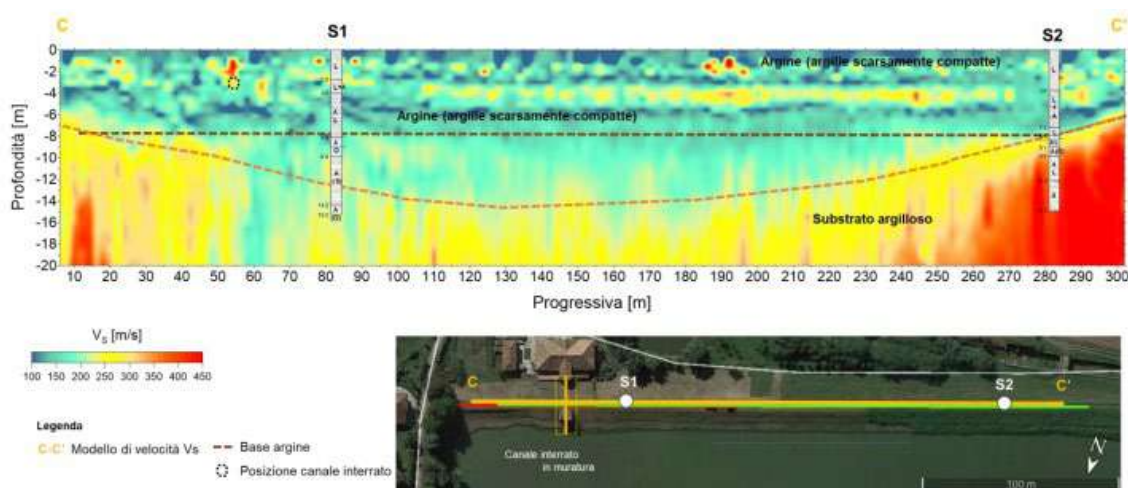


Figura 12: : Modello tomografico di velocità delle onde di taglio V_s (sezione C-C').

2.1.2. Diga “La Grengia” – Envie (CN)

La documentazione esistente di questo invaso è risulta essere meno consistente rispetto l’opera di sbarramento precedente. Da tali documenti si apprende che la diga (Figura 13) fu realizzata nel 1971, sul versante collinare ai piedi del Monte Bracco che sovrasta il comune di Envie (CN). Il corpo diga ha una altezza media di 9.50 m (variando da un minimo di 4.00 m ad un massimo di 15.00 m), e una larghezza del coronamento variabile da 3.60 m e 13.60 m. La profondità massima dell’invaso è 7.60 m con un volume invasato di circa 22’000 m³.



Figura 13: Vista aerea (a sinistra) e panoramica (a destra) dell’invaso “La Grengia” – Envie (CN).

Dalla documentazione si evince che negli anni siano stati installati due piezometri a tubo aperto, mediante la realizzazione di sondaggi condotti a distruzione di nucleo, e la definizione di 3 capisaldi di controllo per la verifica di eventuali spostamenti nel tempo del corpo diga. Non è però stato possibile reperire validi dati di misura. È stata pertanto programmata una campagna di indagine nell’abito del progetto ReSba atta a definire nel dettaglio la composizione stratigrafica del corpo diga e dei terreni di fondazione, e la caratterizzazione

meccanica dei terreni mediante prove di sito. A tal proposito sono state previste e realizzate le seguenti prove: un foro di sondaggio a carotaggio continuo, con il prelievo di alcuni campioni indisturbati, a partire dal coronamento fino alla profondità di 25 m, una prova Down-Hole, avendo provveduto ad attrezzare il foro di sondaggio con idoneo rivestimento, due prove geofisica attive MASW, una sul coronamento e l'altra sull'area a valle dell'invaso, una prova penetrometrica statica con piezo-cono sismico (SCPTU) e una prova con dilatometro piatto tipo Marchetti (DMT), entrambe realizzate nei pressi del sondaggio.

I risultati delle suddette prove sono di seguito riportate. Mediante il sondaggio a carotaggio continuo è stata ottenuta la stratigrafia riportata in Figura 14:

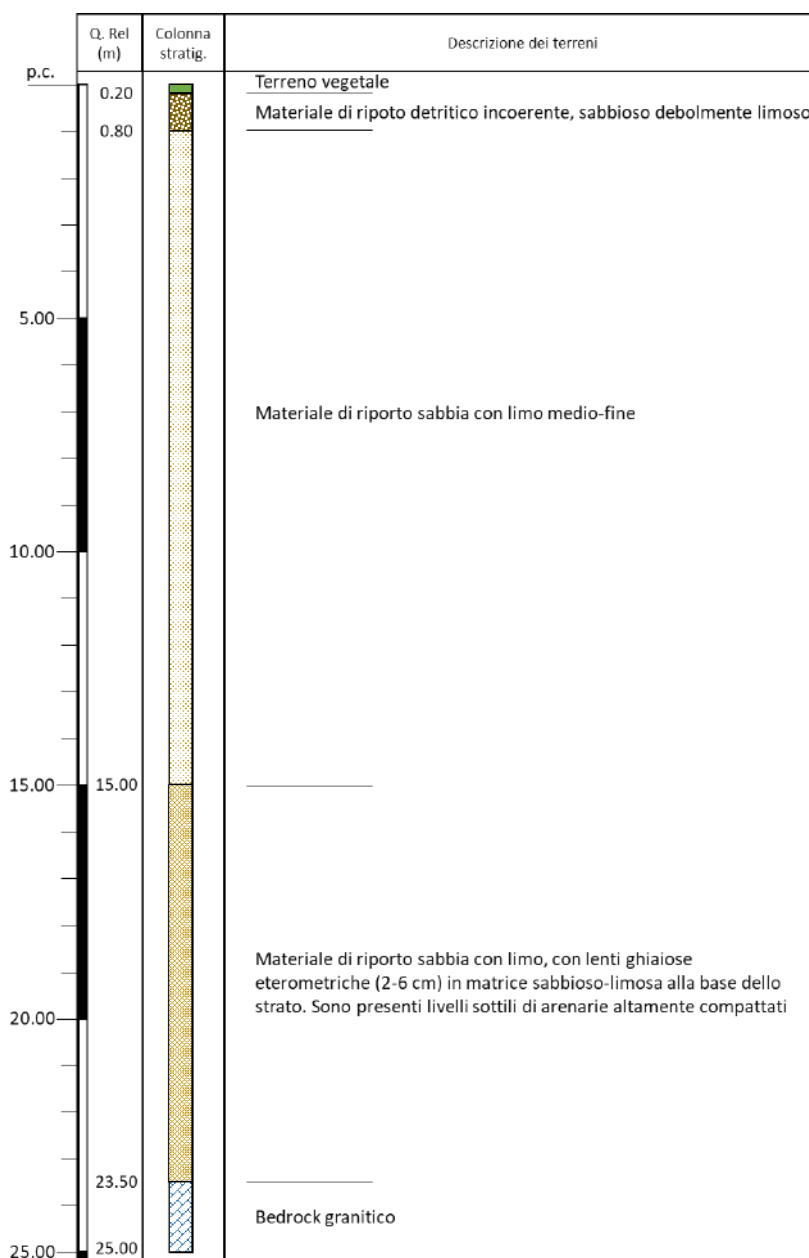


Figura 14: Colonna stratigrafica del sondaggio realizzato a partire dal coronamento dell'invaso "La Grengia" – Envie (CN).

La Figura 15 mostra le misure delle prove SCPTU e i parametri ottenuti mediante la prova DMT.

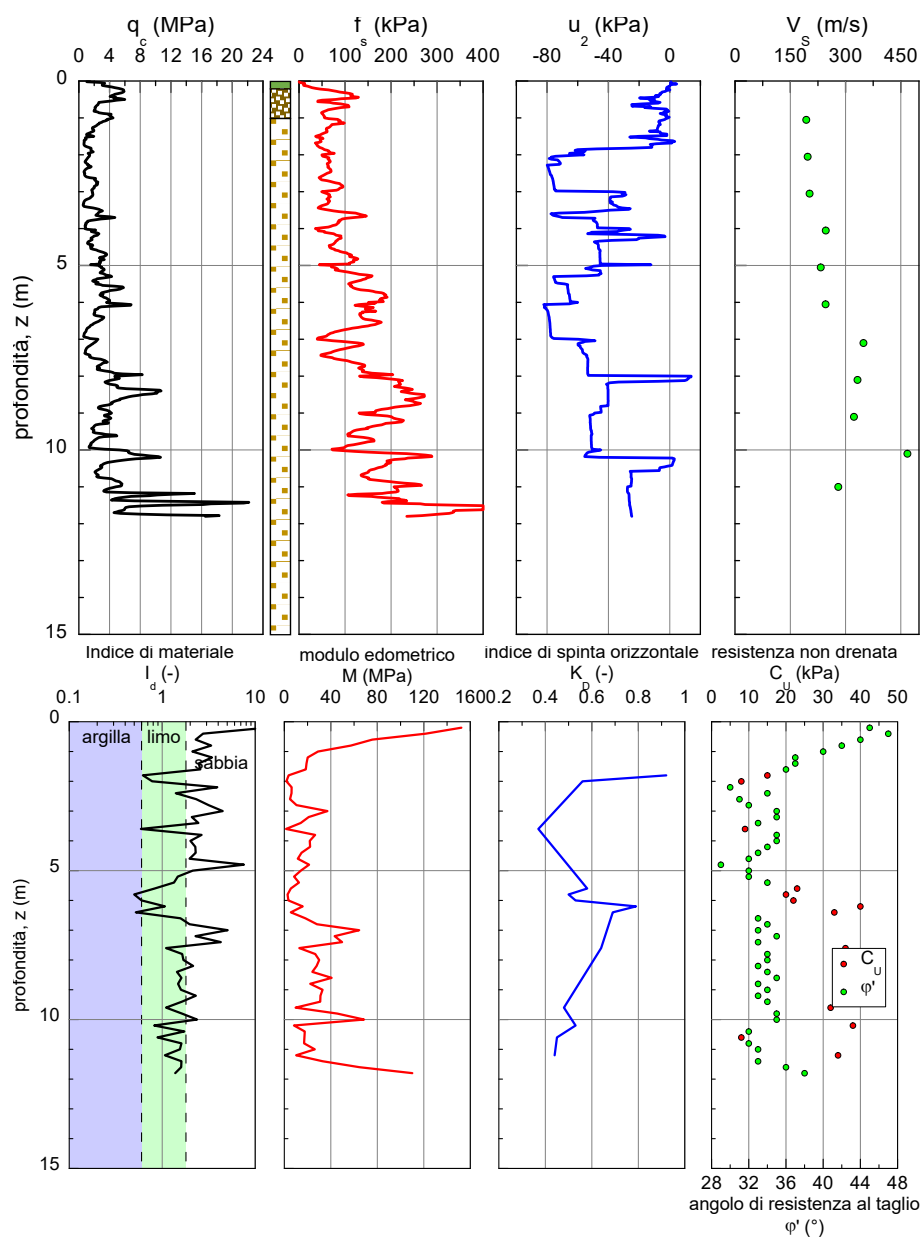


Figura 15: Risultati della prova penetrometrica SCPTU (in alto) e della prova dilatometrica DMT (in basso).

I risultati delle prove Down-Hole sono mostrati in Figura 16.

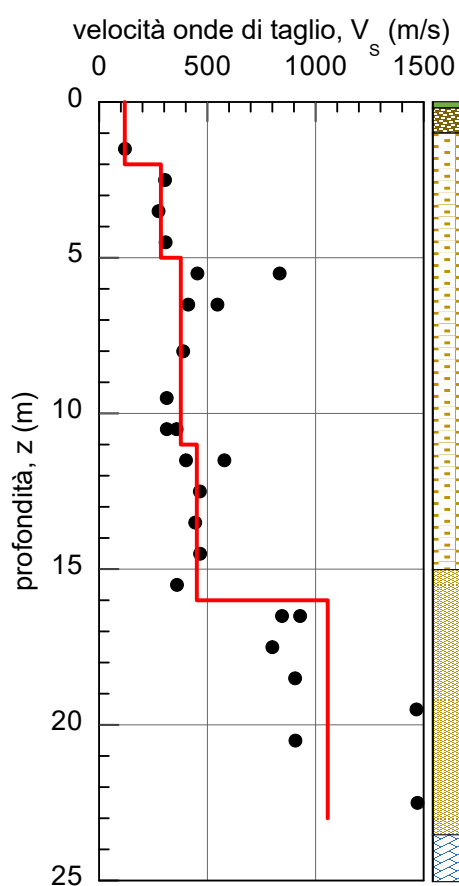


Figura 16: Risultati della prova Down-Hole per l'invaso "La Grengia" – Envie (CN).

Infine, la Figura 17 riporta i miglior profili di velocità, assieme al campione statistico degli intervalli di velocità, ottenuti mediante la interpretazione delle prove geofisiche MASW condotte sul coronamento e nell'area a valle dell'opera di sbarramento.

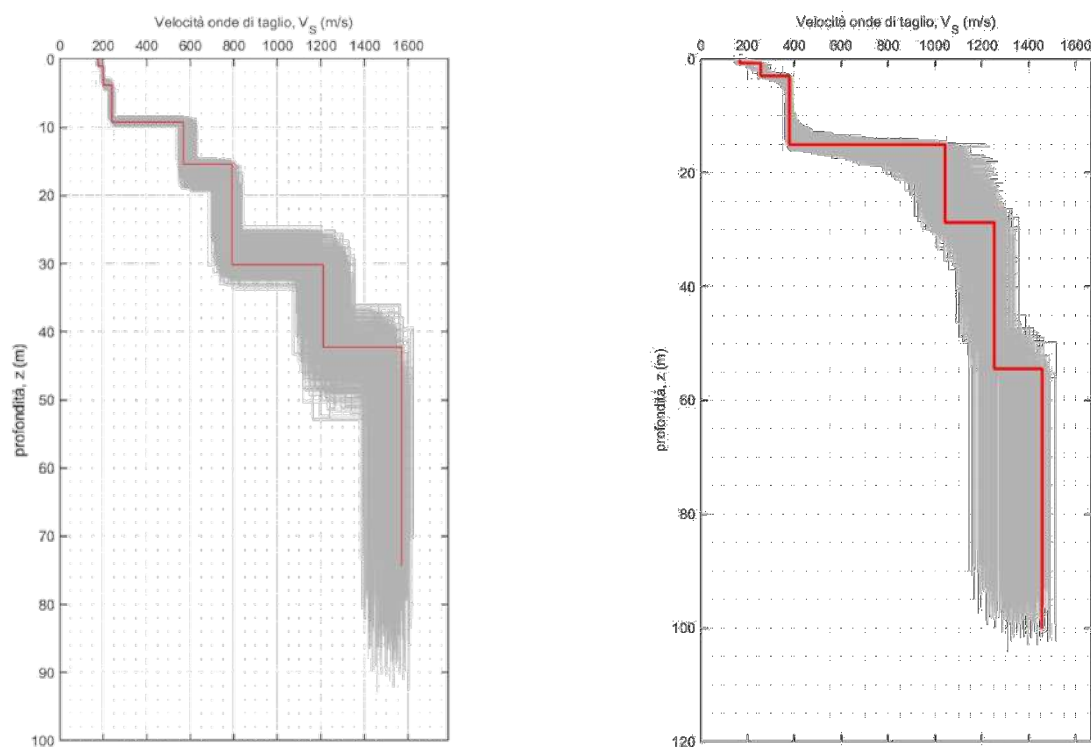


Figura 17: Profili delle velocità V_s valutate a partire dal coronamento (a sinistra) e dal piano campagna a valle del corpo diga (a destra).

2.1.3. Diga Envie - Revello (CN)

La diga sita tra i comuni di Envie e Revello, nella provincia di Cuneo, è l'unica opera in cui non è stato possibile reperire documentazioni esistenti. In tal caso le uniche informazioni sono state desunte dalla campagna di indagine condotta nell'ambito del progetto ReSba.

La diga (Figura 18) sorge in un luogo di non facile accesso tra i comuni di Envie e Revello. Per questo invaso sono state previste e realizzate le seguenti prove: un foro di sondaggio a carotaggio continuo, con il prelievo di alcuni campioni indisturbati, a partire dal coronamento fino alla profondità di 30 m, una prova Down-Hole, avendo provveduto ad attrezzare il foro di sondaggio con idoneo rivestimento, una prova penetrometrica statica con piezo-cono sismico (SCPTU) e una prova con dilatometro piatto tipo Marchetti (DMT), entrambe realizzate nei pressi del predetto sondaggio.



Figura 18: Vista aerea (a sinistra) e realizzazione del sondaggio (a destra) dell'invaso Envie - Revello (CN).

I risultati delle suddette prove sono di seguito riportate. Mediante il sondaggio a carotaggio continuo è stata ottenuta la stratigrafia riportata in Figura 19:

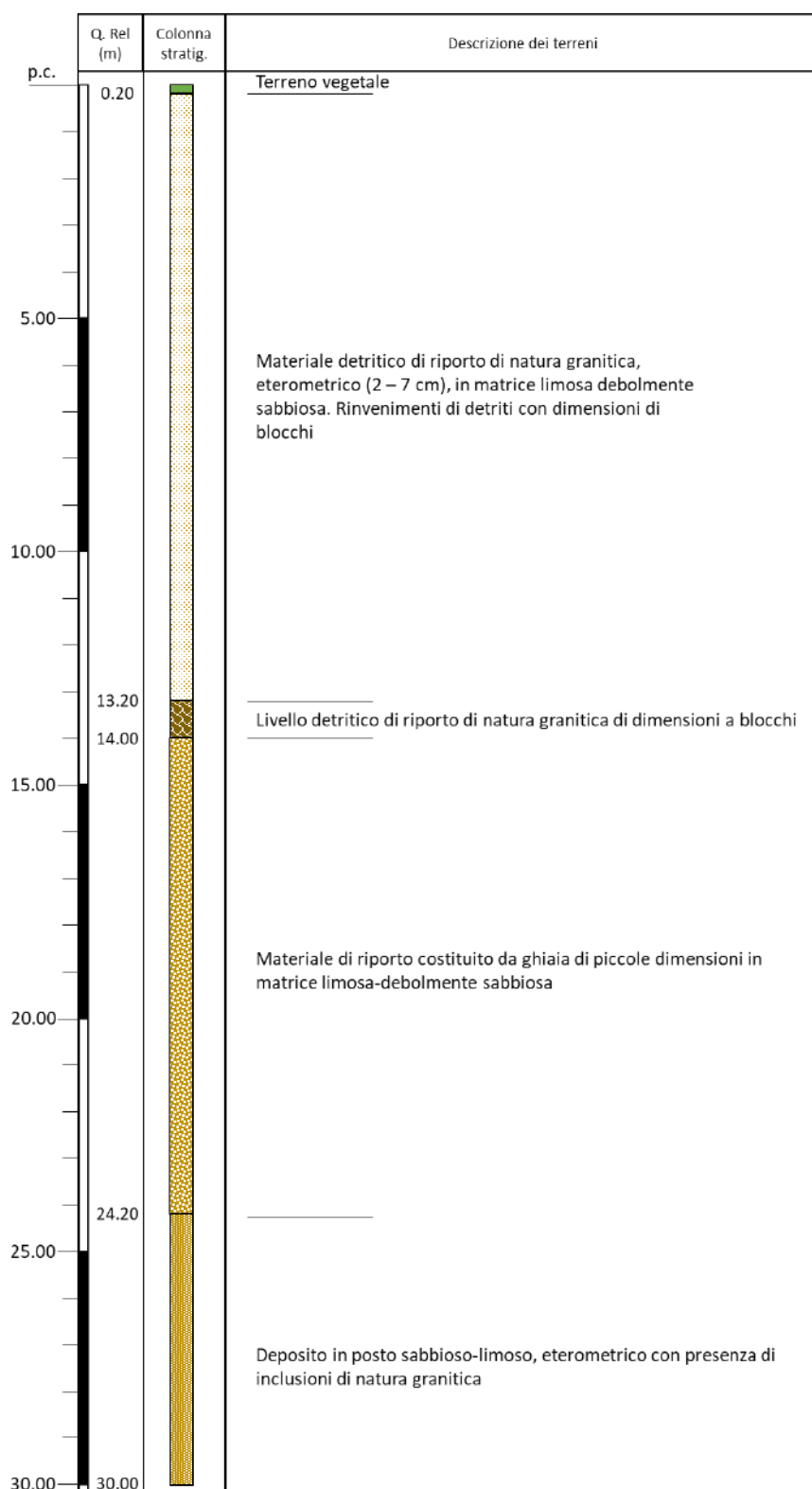


Figura 19: Colonna stratigrafica del sondaggio realizzato a partire dal coronamento dell'invaso sito tra Envie e Revello (CN).

La Figura 20 mostra le misure delle prove SCPTU e i parametri ottenuti mediante la prova DMT. Come è possibile osservare per entrambe le prove, a seguito della eccessiva consistenza del terreno, non è stato possibile procedere ad una adeguata caratterizzazione dei terreni. La prova SCPTU è andata a rifiuto dopo i primi 2 metri, tale per cui anche le misure in termini di velocità delle onde di taglio è stata limitata ad un solo valore. La prova DMT è andata a rifiuto dopo i primi tre metri, e non è stato possibile valutare opportunamente l'indice di spinta orizzontale K_D .

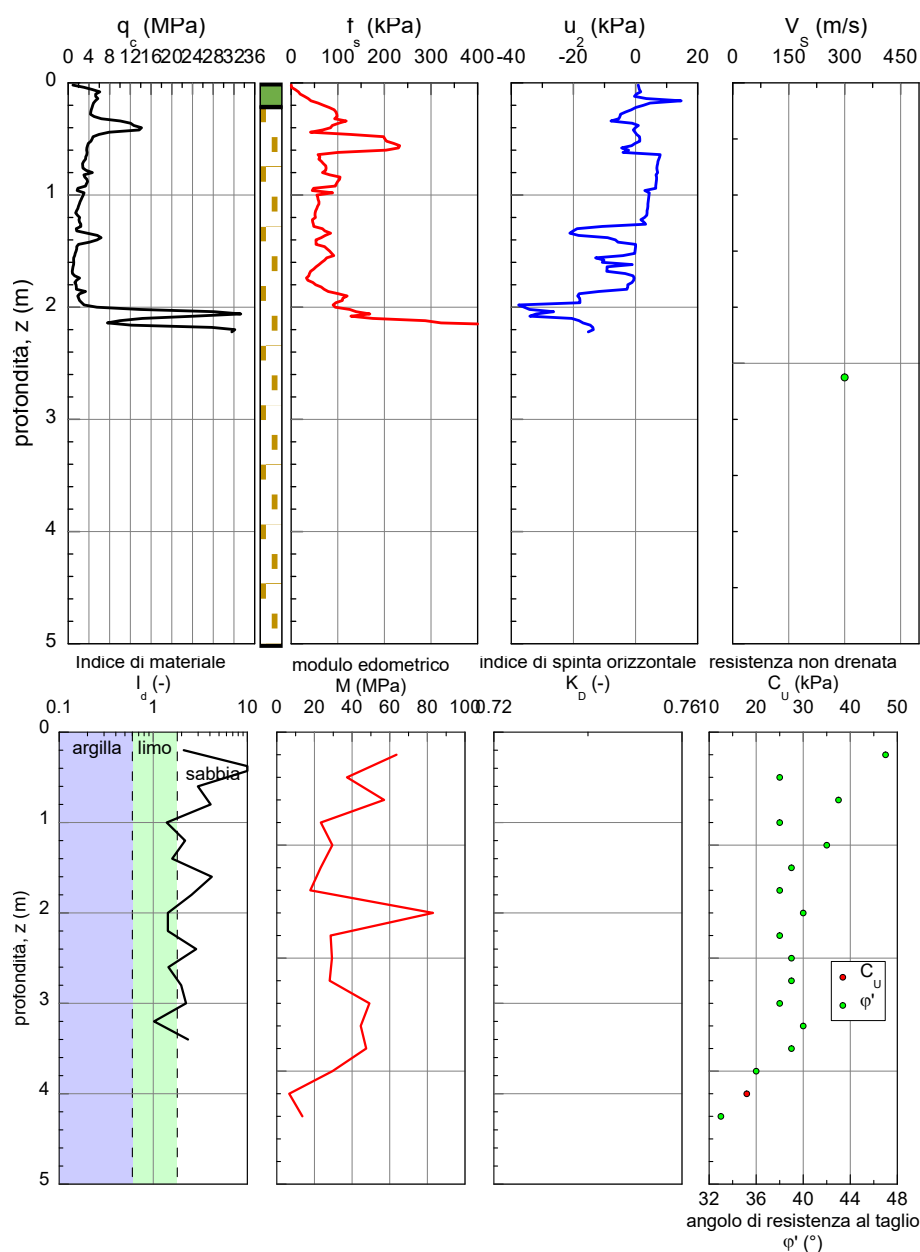


Figura 20: Risultati della prova penetrometrica SCPTU (in alto) e della prova dilatometrica DMT (in basso).

I risultati delle prove Down-Hole sono riportate in Figura 21.

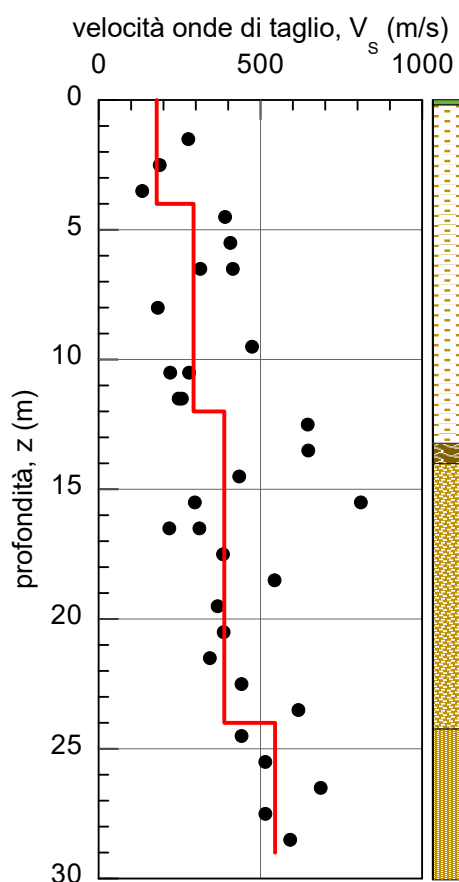


Figura 21: Risultati della prova Down-Hole per l'invaso sito tra i comuni di Envie e Revello (CN).

2.1.4. Diga Niella Tanaro – Briaglia (CN)

La diga di Niella Tanaro - Briaglia (Figura 22) sorge nell'abitato di Briaglia in corrispondenza del fondovalle del Rio del Frocco. Si tratta di una diga in terra omogenea di forma trapezia realizzata all'inizio degli anni 60, con una altezza di circa 11 m, un volume di invaso di 59'500 m³. La larghezza del coronamento è di 3.60 m e lo sbarramento si estende longitudinalmente per 88.50 m. Nell'ambito di una campagna di indagine precedente condotta nel 2013, furono eseguiti due sondaggi utilizzati principalmente per l'installazione di tubi inclinometrici. Nessun dato in merito alle misure inclinometriche risulta dalla documentazione disponibile.



Figura 22: Vista aerea (a sinistra) e panoramica (a destra) dell'invaso Niella Tanaro - Briaglia (CN).

Nell'ambito del progetto ReSba sono state previste e realizzate le seguenti prove: un foro di sondaggio a carotaggio continuo, con il prelievo di alcuni campioni indisturbati, a partire dal coronamento fino alla profondità di 30 m, una prova Down-Hole, avendo provveduto ad attrezzare il foro di sondaggio con idoneo rivestimento, due prove geofisica attive MASW e altrettante prove HVSR, una sul coronamento e l'altra sull'area a valle dell'invaso, una prova penetrometrica statica con piezo-cono sismico (SCPTU) e una prova con dilatometro piatto tipo Marchetti (DMT), entrambe realizzate nei pressi del sondaggio.

I risultati delle suddette prove sono di seguito riportate. Mediante il sondaggio a carotaggio continuo è stata ottenuta la stratigrafia riportata in Figura 23: