

**ITALGEN – DIGA DI CASSIGLIO – OLMO AL BREMBO (BG)**  
**PROGETTO APPESANTIMENTO DIGA**  
**RELAZIONE GEOTECNICA**



Customer: ITALGEN srl – BERGAMO – ITALY  
Date: Gennaio 2018  
Redacted: Ing. Stefano Guido, Dr. Geol. Andrea Martignoni



*Stefano Guido*



*Andrea Martignoni*

## 1 INDICE

1	INDICE .....	2
2	PREMESSA .....	3
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE.....	3
4	SISIMICITA' DELL'AREA .....	6
5	CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIOSO .....	7
6	CARATTERISTICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO .....	7
7	CARATTERISTICHE DEI GIUNTI.....	9
8	STABILITA' DELLE SPONDE DELL'INVASO.....	9
9	VERIFICHE DI PORTANZA – APPROCCIO ANALITICO .....	9
10	VERIFICHE DI PORTANZA – APPROCCIO NUMERICO .....	11
11	VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI TRASMESSE ALLA ROCCIA DALLA VASCA DI DISSIPAZIONE .....	13
12	SCHERMO IMPERMEABILE .....	13
13	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	14
14	BIBLIOGRAFIA.....	15
15	APPENDICE 1 – CALCOLI DI PORTANZA - SOLUZIONE CHIUSA.....	16
16	APPENDICE 2 – FIGURE ANALISI FEM .....	17
17	APPENDICE 3 – SONDAGGI S1 , S2 – 2017 - FOTOGRAFIE , STRATIGRAFIE, CLASSIFICAZIONI TECNICHE .....	18
18	ALLEGATI - TAVOLE .....	19

## 2 PREMESSA

Nell'ambito della progettazione dell'appesantimento della diga di Cassiglio, a oggi, sono stati eseguiti diversi studi di carattere geotecnico/geomeccanico. Nel presente lavoro sono stati integrati i copiosi dati geotecnici già esistenti, con due sondaggi stratigrafici ed un rilevamento geostrutturale eseguiti immediatamente a valle della diga nel letto del fiume, nell'ottobre – novembre 2017.

Sulla base dell'insieme dei dati delle precedenti campagne geognostiche e della campagna 2017, sono stati quindi definiti il modello geotecnico della roccia nell'intorno della sezione di imposta e la sua parametrizzazione.

Sono quindi state eseguite le verifiche di portanza della roccia di fondazione della diga, tenendo anche conto della presenza della natura discontinua dell'ammasso roccioso e del regime di pressione interstiziali causate dall'invaso.

A tal fine sono stati dapprima eseguiti calcoli con una soluzione chiusa risolta a mano, per poi passare ad un approfondimento con modelli FEM, al fine di verificare meccanismi di rottura più complessi di quelli che si possono schematizzare in un calcolo analitico e di fornire una stima delle costanti di Winkler da inserire nei modelli matematici strutturali [15].

Nelle verifiche di portanza, le distribuzioni di forze applicate dalla diga alla roccia sono state tratte dal modello matematico strutturale [15] e sono quindi azioni di progetto, essendo già amplificati dai fattori di sicurezza parziali delle combinazioni SLU. Con le azioni di progetto quindi, è stato utilizzato l'Approccio 2 di NTC2008, verificando che il fattore di sicurezza fosse maggiore del minimo normativo:

$$FS \geq \gamma_R = 2.3$$

In tutti i casi la condizione risulta ampiamente soddisfatta.

Un secondo tipo di verifica riguarda le sollecitazioni applicate alla roccia dalla vasca di dissipazione, che può trasmettere alla roccia un'azione orizzontale 'radente' attraverso le barre di ancoraggio: anche in questo caso la verifica è ampiamente soddisfatta.

Infine, il report documenta i calcoli di dimensionamento dello schermo impermeabile realizzato con iniezioni della roccia, definendone geometria e modalità esecutive attraverso un'apposita tavola.

## 3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

La Dolomia Principale (Trias) costituisce il substrato roccioso della sezione d'imposta di Cassiglio, nonché dei versanti e del fondo del serbatoio artificiale di Cassiglio. Si tratta di una roccia poco sensibile all'alterazione superficiale, organizzata in banchi massicci alternati a pacchi di strati più sottili.

Nella zona di imposta l'ammasso roccioso è di qualità geomeccanica particolarmente buona e forma pareti di roccia stabile praticamente verticali [Torrente 1958] [Alberti 2009].

Lungo le zone di shear, la roccia presenta strutture microfratturate e brecciate ricementate da carbonati. La roccia brecciata, in particolare, ha un'incidenza quantitativamente minore e forma delle lenti di spessore massimo pluridecimetrico e lunghezza di qualche metro, che alla percussione con martello mostrano durezza del tutto simile alla roccia compatta. A livello mesoscopico la Dolomia Principale si presenta in bancate di spessore plurimetrico (foto fig.1) e localmente ben stratificato (spessore da decimetrico a centimetrico (foto fig.3).

Lungo la sezione d'imposta, oltre alla bancatura/stratificazione St, immersa favorevolmente verso monte tra 33° (sponda sx) e 43° (sponda dx) sull'orizzontale (Stasse diga = 220°/40°, fig.1-3), i rilievi geostrutturali/geomeccanici hanno evidenziato altre 3 famiglie di discontinuità denominate K1, K2 e K3 (vedi mappa con stereogrammi di seguito).

Queste ultime sono orientate approssimativamente secondo la direzione della diga (K1 = 60°/50°, K3 = 218°/65°) e ortogonalmente ad essa (K2 = 313°/73°).

La famiglia K2 in particolare, è rappresentata anche da piccole faglie di tipo trascorrente, caratterizzate da lenti di roccia di roccia microfratturata oppure "brecciata" come già descritto sopra (vedi foto fig.4). Dai rilievi effettuati emerge anche che le discontinuità delle varie famiglie sono piuttosto serrate, con rugosità medio-elevata (JRC>14) ed alterazione generalmente bassa, spesso saldate da patine dolomitiche.



Fig.1: sponda dx, andamento della St in bancate massicce di spessore plurimetrico.

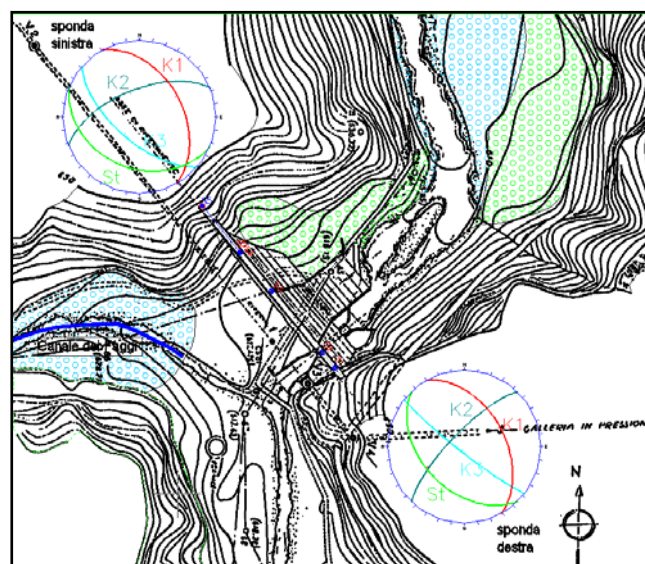


Fig.2: discontinuità tipiche nella roccia lungo la sezione d'imposta, depositi superficiali.



Fig.3: a valle dello scivolo, la St è sottile e divisa da fratture K2 (in rosso).

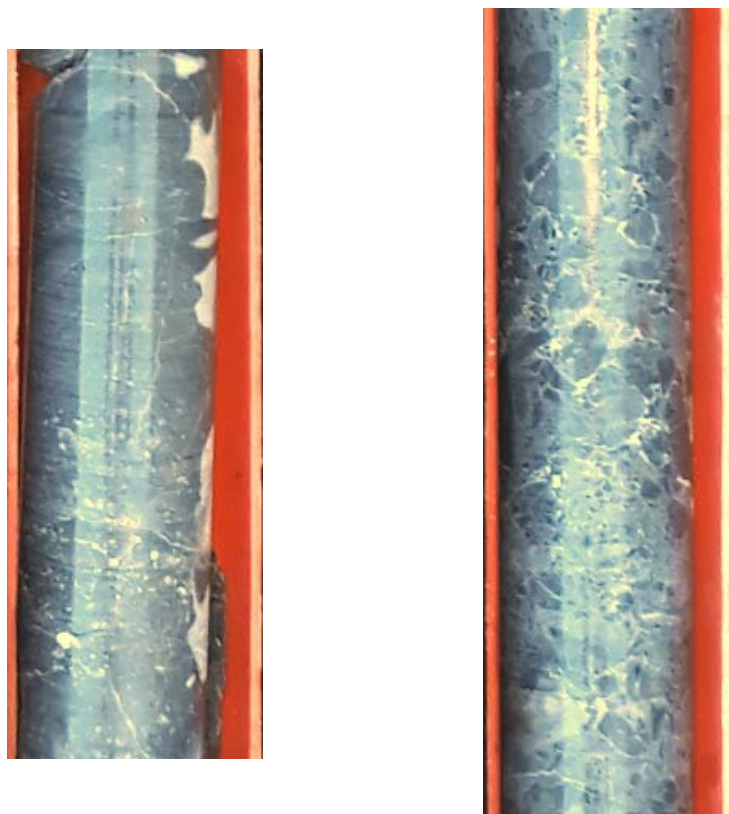


Fig.4: struttura da compatta a poco laminata (sinistra) e “brecciata” a destra (da carotaggi 2017)

Per quanto riguarda lo stato di fratturazione, i carotaggi eseguiti nella campagna 2005 e i più recenti del Novembre 2017 mostrano valori medi del parametro RQD misurati sull'intero sondaggio compresi tra 68% e 9% circa.

	2005 coronamento diga					2017 valle diga		
Sondaggio	S1	S2	S3	S4	S5	S1-17	S2-17	
	DX				SX		DX	DX =>ASSE
<b>RQD medio %</b>	67.8	45.0	32.3	8.7	49.3	64.0	66.0	
<b>RQD range%</b>	15-100	0-80	0-100	0-10	0-100	0-100	38-86	

Una zona più fratturata si ritrova solo in corrispondenza del sondaggio S.4 (2005, RQD = 0%-10%), sul lato sinistro della fondazione, Tale zona, già oggetto di consolidazioni da parte della Rodio nel 1989 [CTG-2005], ha dato anche i risultati anche più elevati di permeabilità K (47,5 e 8,3 x 10<sup>-7</sup> m/s) nelle prove Lugeon del 2005. Incrociando i dati geostrutturali e petrografici, risulta che il peggioramento localizzato della roccia in zona S.4 è interpretabile come intersezione di un pacchetto di strati più sottili con una fascia subparallela alla valle dove le K2 si rinfittiscono. In tali condizioni il carotaggio tende a produrre campioni più fratturati. La presenza di punti della roccia con questo comportamento risulta anche dalle tomografie Ismes [3]; queste avevano messo in evidenza un

ammasso roccioso con caratteristiche elastiche nel complesso inferiori a quelle del calcestruzzo del corpo diga e la presenza di volumi di forma tabulare concordanti con la stratificazione (fig.5) con velocità sismiche inferiori a 4000 m/s.

Ciò è stato confermato anche dai sondaggi del 2017 che hanno premesso di escludere l'ipotesi che questa zona si estendesse a valle del paramento, confermando che la zona fratturata intercettata dal sondaggio S4 abbia andamento concorde alla stratificazione.

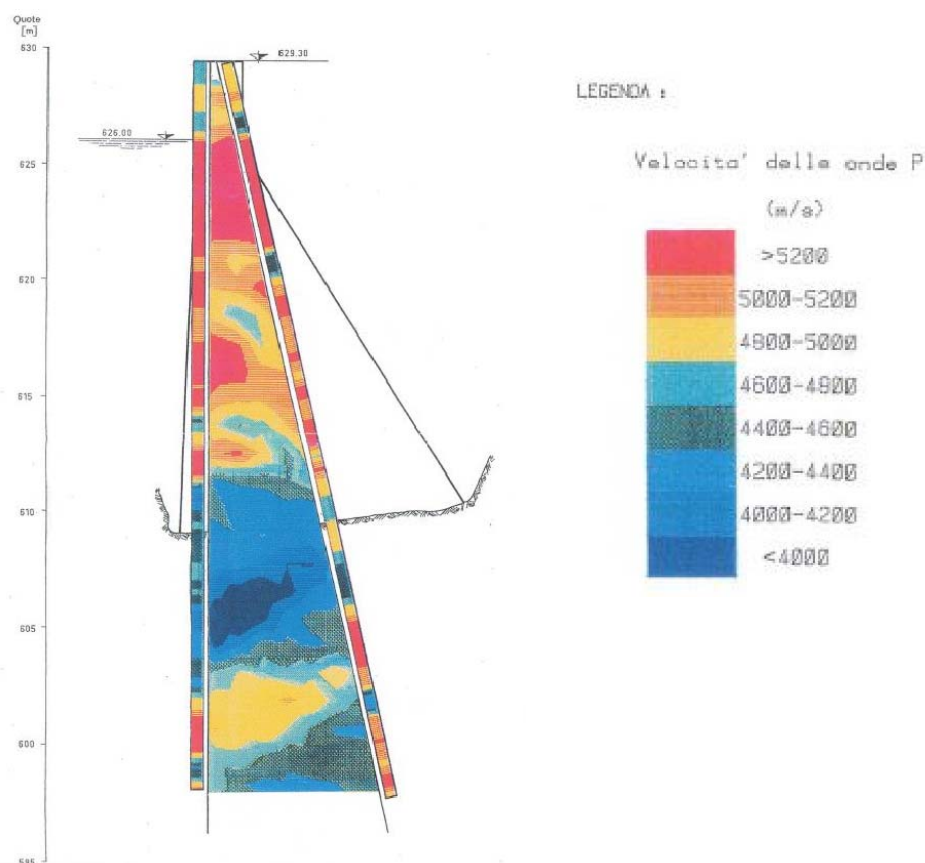


Fig.5: tomografia sonica lungo l'asse della diga (Ismes, 1996)

Nella Tavola 01 è rappresentata una vista planimetrica con le tracce di 3 sezioni geotecniche. Le sezioni sono rappresentate nella Tavola 02. La sezione 1 è ortogonale allo sbarramento, mentre la sezione 2 è in asse alla diga. La sezione 3, ubicata 10 m circa a valle del piede della diga, è parallela alla sezione 2 ed è il piano trasversale alla valle cui appartiene il carotaggio S2-2017.

Nelle tavola sono rappresentati il manufatto e i sondaggi realizzati nel 2005 e nel 2017. Nelle sezioni, a ciascun sondaggio è associato il grafico di RQD e UL (Unità Lugeon).

Le figura rappresenta schematicamente l'andamento dei banchi rocciosi, le discontinuità K1-K3 più importanti e persistenti riconosciute in situ. In particolare, sulla sezione 2 si osserva come la roccia, nella zona a basso RQD del sondaggio S4, abbia volume roccioso unitario ridotto a causa del rinfittirsi delle strutture K2 in concomitanza a strati più sottili.

#### 4 SISIMICITA' DELL'AREA

Per quanto riguarda la sismicità dell'area, si rimanda al rapporto di P&P [15]. Le verifiche di portanza tengono conto delle azioni sismiche perché sono state utilizzate le azioni provenienti dalle combinazioni di carichi agli stati limite dei modelli di

calcolo strutturale. Per quanto riguarda le azioni inerziali sulla roccia di fondazione si assumono cautelativamente i coefficienti sismici orizzontale  $k_h = 0.10$  e verticale  $k_v = -0.05$  (diretto verso l'alto).

## 5 CARATTERISTICHE DEL MATERIALE ROCCIOSO

Le caratteristiche del materiale roccioso sono state indagate in dettaglio nella campagna 2005 [11][12][13].

Per interpretare le prove è stato usato il criterio di Hoek e Brown [16].

Tabella 1 – Risultato prove di laboratorio

Materiale	UCS [MPa]	mi	Et [MPa]
Dolomia	51	35	17990
Dolomia Brecciata	47	35	15660
Interpretazione di assieme dei due litotipi	51	31	16800

UCS: resistenza a compressione uniassiale

mi: parametro di resistenza del criterio di Hoek e Brown

Et: modulo tangente a metà carico di rottura in condizioni di compressione uniassiale

I due litotipi definiti come Dolomia e Dolomia Brecciata risultano molto simili dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche. Non ha quindi senso tecnico distinguerli nel prosieguo.

## 6 CARATTERISTICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Le precedenti campagne geognostiche hanno prodotto la classificazione tecnica della roccia secondo il metodo RMR.

Un'ulteriore classificazione è stata eseguita sui carotaggi S1.2017 e S2.2017 applicando il metodo Q-Index [Appendice 1].

Il risultato delle classificazioni è riassunto nella tabella 2, dove si comparano i valori GSI, un parametro che esprime la qualità intrinseca dell'ammasso roccioso, ottenuto con le classiche correlazioni:

$$GSI = RMR_{89,BASIC} - 5 \quad (\text{per le classificazioni 2005 [13] e 2009 [14]})$$

$$GSI = \exp[(GSI - 44) / 9] \quad (\text{per le classificazioni 2017})$$

Tabella 2 – Risultato classificazioni tecniche ammasso roccioso

	CTG 2005	Alberti 2009	Sondaggi S1,S2 2017
GSI Ammasso tipico	56	56	65
GSI zone più fratturate	42	41	(non intersecate con spessori significativi)

UCS: resistenza a compressione uniassiale

mi: parametro di resistenza del criterio di Hoek e Brown

Et: modulo tangente a metà carico di rottura in condizioni di compressione uniassiale

Si osserva come i recenti sondaggi tendano a rivalutare leggermente la qualità geomeccanica intrinseca dell'ammasso roccioso che risulta, complessivamente, un ammasso di qualità media:

$$GSI = 56$$

Con volumi limitati di qualità più scadente:

$$GSI = 41$$

Per stimare i parametri meccanici dell'ammasso da usare nelle verifiche, si ricorre a classiche correlazioni empiriche che costituiscono di fatto uno standard internazionale [16][17].

Le correlazioni consentono di scalare i parametri meccanici del materiale roccioso:

$E_i = 16800 \text{ MPa}$	modulo elastico tangente
$UCS = 51 \text{ MPa}$	resistenza compressione uniassiale
$m = 31$	parametro di Hoek e Brown
$s = 1.0$	parametro di Hoek e Brown

in funzione dei parametri dell'ammasso:

D: parametro danneggiamento ammasso dovuto ad azione di scavo (in questo caso  $D=0$ )

GSI: indice classificazione tecnica ammasso

Per quanto riguarda il modulo elastico si utilizza l'equazione di Hoek Diederichs:

$$E = E_i * [ 0.02 + ( 1 - D / 2 ) * [ 1 + e^{(60 + 15 * D - GSI) / 11} ] ]$$

E: modulo elastico ammasso roccioso

Per i parametri di resistenza si usa il criterio di Hoek e Brown dell'ammasso roccioso:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + UCS * ( m * \sigma_3 / UCS + s )^a$$

$\sigma_1, \sigma_3$  : tensioni principali massima e minima

Per definire i parametri si usano le correlazioni di Hoek [16]:

$$s = e^{(GSI - 100 / 9 - 3 * D)}$$

$$m = m_i * e^{(GSI - 100 / 28 - 14 * D)}$$

$$a = 0.5 + (1/6) * ( e^{-GSI/15} - e^{-20/3} )$$

Applicando le correlazioni si ottengono i parametri di massoo riassunti in tabella 3. Si osserva un buon accordo tra i moduli dilatometrici e quelli stimati sulla base delle correlazioni.

Tabella 3 – Parametri meccanici dell'ammasso roccioso dedotti da correlazioni con GSI

Descrizione	Edil [MPa]	GSI	E [MPa]	m	s	a	$\sigma_{cm}$ [MPa]
Ammasso tipico	6446 (medio)	41	7493	6.04	0.0075	0.504	4.3
Zone poco estese più fratturate	3197 (minimo)	56	3405	4.05	0.0018	0.509	2.1

Edil: modulo prove dilatometriche campagna 2005;

m, s,  $\sigma_{cm}$  : parametri di resistenza ammasso roccioso



## 7 CARATTERISTICHE DEI GIUNTI

Tenendo conto dell'effetto scala, per le verifiche che seguono si adottano valori ridotti dei parametri JRC e JCS in base alla seguente formule proposte da Barton e Bandis [18]:

$$JRC_n = JRC_0(L_n / L_0)^{-0.02 JRC_0} = 6$$

$$JCS_n = JCS_0(L_n / L_0)^{-0.02 JRC_0} = 10 \text{ MPa}$$

Dove  $JRC_0$ ,  $JCS_0$  e  $L_0$  fanno riferimento a un giunto di 100 mm,  $JRC_n$ ,  $JCS_n$  e  $L_0$  a un giunto con dimensione caratteristica 2000 mm

## 8 STABILITA' DELLE SPONDE DELL'INVASO

Sulle le sponde dell'invaso, non è stata rilevata presenza di fenomeni di instabilità o di degradazione in atto o potenziali [Alberti 2009]. Il substrato roccioso affiora sia nella zona dello sbarramento che in quelle immediatamente a monte, su entrambe le sponde. A monte della diga, sia in destra che in sinistra idrografica, sono presenti detriti di versante e depositi di conoide alluvionale. In particolare una grossa conoide in asse alla valle si sedimenta direttamente nell'invaso, cambiando gradualmente la sua granulometria da alluvioni grossolane in sedimenti più fini di tipo lacustre.

Per quanto riguarda le sponde rocciose, considerate le caratteristiche degli ammassi presenti e i discreti parametri di resistenza meccanica, non si rilevano problemi per la stabilità globale anche per rapido svaso. Lo stesso si può dire anche per le sponde ricoperte da depositi superficiali, che sono caratterizzati da buoni parametri di resistenza geotecnica, pendenze relativamente basse ed elevata permeabilità.

## 9 VERIFICHE DI PORTANZA – APPROCCIO ANALITICO

Le distribuzioni di forze applicate dalla diga alla roccia di fondazione sono tratte dal modello matematico strutturale [15] e sono quindi azioni di progetto, essendo già amplificate dai fattori di sicurezza parziali propri delle combinazioni SLU.

Con le azioni di progetto è stato utilizzare l' Approccio 2 di NTC2008, verificano che il fattore di sicurezza fosse maggiore del minimo normativo:

$$FS \geq \gamma_R = 2.3$$

È stato preso in esame il risultato del modello strutturale riferito a 5 sezioni monte valle (figura 6 e tabella 4).

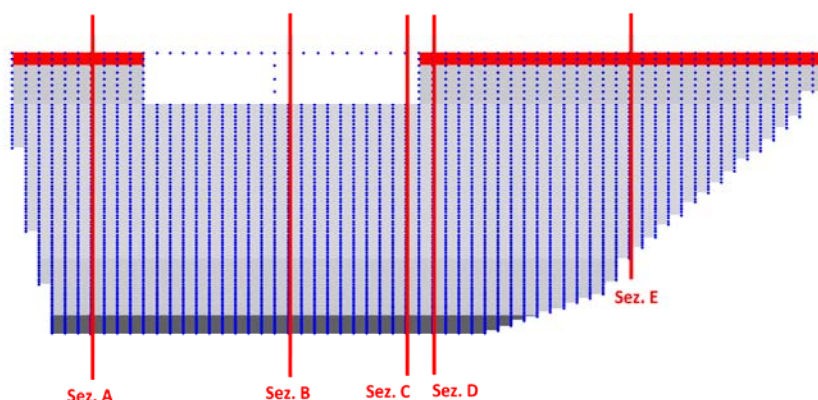


Figura 6 – tracce delle sezioni di verifica; la diga è osservata da valle verso monte.

Siccome le sezioni B e D danno distribuzioni di carico praticamente uguali a quelle delle sezioni B e D, è superfluo considerarle nelle ulteriori verifiche geotecniche.

Innanzitutto si osserva che nei casi delle sezioni A e C la pressione media applicata è sempre inferiore a 0.4 MPa ( $\leq 403$  kPa). Poiché la resistenza a compressione stimata dell'ammasso roccioso è di circa 4.2 MPa (rif tabella 3), il fattore di sicurezza FS(1) nei confronti della rottura a compressione della roccia è sempre  $> 10$ , ampiamente superiore al minimo normativo  $\gamma_R = 2.3$ .

Per la sezione C dove, localmente, è stata riscontrata la presenza di roccia più fratturata (rif paragrafi 3 e 6), la resistenza di ammasso diminuisce (2.2 MPa, rif. tabella 2) ma il fattore di sicurezza rimane comunque elevato ( $> 7$ , rif tabella 5).

Per quanto riguarda il fattore di sicurezza FS(2) nei confronti dello scivolamento sui giunti St, solo per la sezione E, diminuendo l'inclinazione della stratificazione spostandosi verso verso la sponda sinistra, in qualche caso è possibile cinematicamente lo scivolamento ma con fattori di sicurezza  $> 20$  (rif. tabella 5).

Il risultato delle verifiche è riassunto in tabella 5. In tutti i casi i fattori di sicurezza sono molto elevati. In tutti i casi risulta ampiamente soddisfatta la condizione  $FS > Gr = 2.3$ , posta da NTC-2008.

Tabella 4- Azioni di progetto applicate al terreno calcolate dal modello strutturale (riferite a concio di larghezza 1m fuori piano).

Sezione	combinazione	D [m]	$\alpha$ [°]	f [kPa]	F [kN]	$\beta$ [°]
A	Ex+0.3Ez (SLC)	16.7	42	330	5511	24.4
	Ex-0.3Ez (SLC)			345	5762	24.0
	-Ex+0.3Ez (SLC)			292	4876	8.6
	Eccezionale			331	5528	20.3
	SLU 1			403	6730	16.4
	SLU 2			311	5194	16.1
C	Ex+0.3Ez (SLC)	17.9	38	308	5144	18.3
	Ex-0.3Ez (SLC)			308	5144	18.3
	-Ex+0.3Ez (SLC)			303	5060	17.2
	Eccezionale			323	5394	20.6
	SLU 1			393	6563	16.6
	SLU 2			303	5060	16.3
E	Ex+0.3Ez (SLC)	15.4	34	253	3896	22.1
	Ex-0.3Ez (SLC)			266	4096	21.8
	-Ex+0.3Ez (SLC)			229	3527	4.8
	Eccezionale			258	3973	18.5
	SLU 1			313	4820	13.8
	SLU 2			241	3711	13.3

D: spessore della diga alla base       $\alpha$ : inclinazione giunti sistema St

f, F: forza distribuita e forza totale di contatto diga/roccia, calcolate dal modello strutturale

$\beta$ : inclinazione di f ed F rispetto alla verticale, calcolata dal modello strutturale

Tabella 5- Risultato verifiche di portanza con metodi analitici – la tabella riassume i risultati delle verifiche (rif. Appendice 1)

Sezione	combinazione	$\sigma_{cm}$ [MPa]	$\alpha$ [°]	f [kPa]	$\beta$ [°]	FS(1)	FS(2)
A	Ex+0.3Ez (SLC)	4.3	42	330	24.4	13.3	stabile
	Ex-0.3Ez (SLC)			345	24.0	12.5	stabile
	-Ex+0.3Ez (SLC)			292	8.6	14.7	stabile
	Eccezionale			331	20.3	13.0	stabile
	SLU 1			403	16.4	10.7	stabile
	SLU 2			311	16.1	13.8	stabile
C	Ex+0.3Ez (SLC)	4.3	38	308	18.3	14.0	stabile
	Ex-0.3Ez (SLC)			308	18.3	14.0	stabile
	-Ex+0.3Ez (SLC)			303	17.2	14.2	stabile
	Eccezionale			323	20.6	13.3	stabile
	SLU 1			393	16.6	10.8	stabile
	SLU 2			303	16.3	14.2	stabile
E	Ex+0.3Ez (SLC)	2.2	34	253	22.1	8.7	24.3
	Ex-0.3Ez (SLC)			266	21.8	8.3	35.5
	-Ex+0.3Ez (SLC)			229	4.8	9.6	stabile
	Eccezionale			258	18.5	8.5	stabile
	SLU 1			313	13.8	7.0	stabile
	SLU 2			241	13.3	9.1	stabile

- $\sigma_{cm}$ : resistenza a compressione uniassiale dell'ammasso roccioso  
 f: pressione media applicata dalla diga alla roccia di fondazione  
 a: inclinazione della stratificazione  
 FS(1),FS(2): fattori sicurezza, rispettivamente per rottura a compressione della roccia e a taglio dei giunti St

## 10 VERIFICHE DI PORTANZA – APPROCCIO NUMERICO

L'approfondimento con modelli numerici ha il fine di verificare un meccanismo di rottura più complesso e realistico di quello che si può schematizzare in un calcolo analitico, e di fornire al contempo una stima delle costanti di Winkler da inserire nei modelli matematici strutturali dove il terreno di fondazione è rappresentato da un letto di molle nodali [15].

Per questo calcolo è stato utilizzato un modello ad elementi finiti 2D sviluppato mediante il codice Phase 2.D versione 2. [www.rosience.com].

In Appendice 2 sono raccolte alcune figure per illustrare la geometria dei modelli, le condizioni al contorno e i risultati delle analisi.

La discretizzazione è costituita da circa 6500 elementi triangolari a 3 nodi con funzioni di interpolazione lineari.

Il calcolo si riferisce alle sezioni monte-valle A, ed E, in stato di deformazione piana, già prese in esame con il calcolo analitico.

In particolare si considerano le seguenti combinazioni di carico:

sezione	GSI	combinazione
A	56	SLU1
E	41	SLU1

La diga non è rappresentata in maniera esplicita nei modelli, ma solo dal carico distribuito applicato all'impronta del contatto con la roccia (figura A2.4).

La piezometrica a monte è alta 20 m mentre a valle della diga si assume un battente idraulico di 2 m (figura A2.1).

I modelli rappresentano esplicitamente la roccia di fondazione come mezzo discontinuo.

I due sistemi di giunti St e K1 sono modellati con appositi elementi interfaccia elastoplastici, caratterizzati da criterio di resistenza di Barton Bandis.

I blocchi di roccia separati dai giunti sono schematizzati attraverso due materiali elastoplastici e isotropi, corrispondenti a GSI=43 e GSI=56, aventi criterio di resistenza di Hoek e Brown. Il materiale GSI=43 rappresenta le condizioni locali di roccia più fratturata osservate nel sondaggio S4.2005 ed è utilizzato solo per la sezione E, che è la sola influenzata dalla situazione locale osservata con il sondaggio S.04 (Tavola 02, Sezione 2).

Le caratteristiche dei materiali del modello sono riassunte nelle tabelle 6° e 6b.

Tabella 6a – Parametri geotecnici usati nei modelli FEM – Blocchi di roccia isotropi separati dai giunti

Descrizione	GSI	E	m	s	a
Zone poco estese più fratturate (1)	41	3405	6.04	0.0075	0.504
Ammasso tipico	56	7400	4.50	0.0018	0.509

(1) Materiale usato solo nella sezione E

Tabella 6b – Parametri geotecnici usati nei modelli FEM – Discontinuità

Descrizione	JRC	JCS	$\phi_r$ [°]	Kn [MPa/m]	Ks [MPa/m]
Giunti K1 e St	6(1)	10(1)	6.04	10000 - 100000	4000 - 40000

(1) I valori 14 osservati nei rilevamenti geostrukturali sono stati ridotti per tenere conto dell'effetto scala

(2) Kn e Ks sono la rigidità normale e di taglio per gli elementi interfaccia che rappresentano i giunti; per ciascun caso sono stati eseguiti 2 calcoli con i valori minimi e massimi dell'intervallo indicato in tabella

Ciascun calcolo è articolato in varie fasi, applicando dapprima alla roccia lo stato tensionale iniziale, per poi schematizzare il carico della diga e il riempimento del bacino, l'azione sismica inerziale sulla roccia di fondazione e, infine, incrementare gradualmente i carichi applicati fino a produrre nel modello, un fenomeno fittizio di rottura. Il fattore di sicurezza è calcolato come rapporto tra il carico che produce la rottura della roccia di fondazione e il carico di progetto.

Il risultato delle analisi FEM è riassunto in tabella 7. Si consideri che i modelli FEM forniscono fattori di sicurezza complessivi, di meccanismi dove si possono rompere sia i blocchi che i giunti contemporaneamente.

A titolo di esempio, la figura A2.6, riferita alla sezione E, rappresenta il campo di spostamenti verticali calcolati in corrispondenza di una amplificazione del carico di progetto con fattore 50. La figura A2.7 rappresenta la corrispondente distribuzione della tensione principale massima nella roccia.

Tabella 7- Risultato analisi FEM.

	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	f [kPa]	$\sigma$ [kPa]	$\tau$ [kPa]	uv [mm]	uh [mm]	kw.v [MN/m <sup>3</sup> ]	kw.h [MN/m <sup>3</sup> ]	FS
Sezione A	42	16.4	403	366	120	1.4	0.8	249 -	153	> 15
Sezione E	34	13.8	313	293	77	1.0	0.4	280-	200	> 15

f: forza distribuita media applicata dalla diga alla roccia di fondazione

$\beta$ : inclinazione di f rispetto alla verticale

$\alpha$ : inclinazione della stratificazione

$\sigma, \tau$ : tensioni di contatto corrispondenti alla forza distribuita f

uv, uh: spostamenti medi verticale e orizzontale, corrispondenti all'applicazione di f

kw.v, kw.h : moduli di Winkler verticale e orizzontale (rapporti tra tensioni medie e spostamenti medi) ottenuti dai calcoli dove i giunti erano più deformabili

In generale i calcoli FEM confermano gli elevati fattori di sicurezza dei modelli analitici.

In merito alle costanti di Winkler si osserva che, nel caso della sezione E, pur essendo l'ammasso roccioso dei blocchi delimitati dai giunti più scadente rispetto alla sezione A, le rigidità della roccia sono comparabili. Questo si spiega con minori effetti non lineari dei giunti, dovuti alla minore entità della pressione applicata alla roccia, e alla maggiore verticalità della forza complessiva.

## 11 VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI TRASMESSE ALLA ROCCIA DALLA VASCA DI DISSIPAZIONE

Si assume che la vasca trasmetta alla roccia un'azione radente  $\tau$  uguale alla resistenza a tranciamento di una barra di ancoraggio divisa per la sua area di influenza A:

$L = 1.5$ m	maglia delle barre
$A_i = 1.5^2 = 2.25$ m <sup>2</sup>	area di influenza della singola barra
$f_y = 260$ N/mm <sup>2</sup>	resistenza a taglio acciaio B450C

con diametro barra di 30 mm si ottiene

$$R = 260 * (\pi / 4) * 30^2 \text{ N} = 184 \text{ kN}$$

$$\tau = 184 / 2.25 = 0.08 \text{ MPa}$$

La tensione normale applicata alla roccia dovuta al peso della vasca piena si ottiene considerando uno spessore del fondo in calcestruzzo di 1.4m e un livello dell'acqua di 7 m. Si ottiene:

$$s = 10 * 7 + 25 * 1.4 = 105 \text{ kPa} = 0.11 \text{ MPa}$$

I due valori sono modesti e di entità comparabile. Il carico totale applicato alla roccia ha inclinazione di circa 55°, ed agisce in pratica ortogonalmente ai giunti di strato. Queste considerazioni escludono la possibilità cinematica di scivolamento lungo St.

Pertanto le sollecitazioni modeste escludono rotture a compressione della roccia.

Ogni ulteriore verifica è superflua.

## 12 SCHERMO IMPERMEABILE

Le caratteristiche schermo impermeabile sono illustrate nella tavola allegata avente codifica sial.tec-003.

Le prove di permeabilità Lugeon eseguite nel 2005 [ ] evidenziano come nelle due sponde la roccia sia praticamente impermeabile. E che, sotto la fondazione della diga, solo localmente si sono superate le 5 Unità Lugeon (rif. tavola 2).

Si è quindi optato per eseguire un trattamento moderato intensificato solamente in corrispondenza della fascia più fratturata posta verso il lato sinistro della diga, intercettata dal sondaggio S4 del 2005.

Per definire la profondità dello schermo si è tenuto conto di classiche correlazioni con l'altezza di vaso assumendo:

$$Z > (2/3)*H = 2/3 * 20 > 13.3 \text{ m}$$

Lo schermo sarà realizzato con iniezioni cementizie selettive e ripetute, mediante canne valvolate (cane a manchette) con spaziatura valvole 1.5 m (rif. tavola sial.tec-003).

Le perforazioni sono state orientate tenendo conto della struttura della roccia, cercando di intercettare il maggior numero di giunti possibile (rif. prospetto tavola sial.tec-003).

Il trattamento è suddiviso in tre fasi con iniezioni primarie e secondarie, intensificando con iniezioni terziarie nelle zone che si presumono più permeabili.

Per le pressioni di iniezione si prescrive il seguente limite superiore in funzione della profondità z della valvola:

$$P = 2 + 0.25 z$$

Dove P e z sono espressi in bar e in m.

La fine dell'iniezione di ciascuna valvola si realizza quando si raggiunge una delle seguenti condizioni

$$\text{GIN} = 350 \text{ bar} \cdot \text{l/m}$$

$$K_{\text{rock}} < 3 \text{ Unità Lugeon}$$

Dove GIN è il parametro dell'approccio energetico sviluppato da Lombardi [19], mentre K<sub>rock</sub> è la permeabilità della roccia misurata con prove Lugeon di controllo dell'efficacia del trattamento.

## 13 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- [1] Torrente A., Aprile 1951, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Relazione geologica preliminare, Lodi.
- [2] Ismes, Marzo 1988, Impianto idroelettrico di Olmo, al Brembo, Diga di Cassiglio: Indagini geotecniche e installazione di strumentazione, Bergamo;
- [3] - Ismes, 14/06/1988, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Indagini geofisiche con metodi sonici, Bergamo;
- [4] - Ismes, 29/06/1988, Impianto idroelettrico di Olmo, al Brembo, Diga di Cassiglio: Indagini sulla muratura in calcestruzzo e nella roccia di fondazione mediante prove di laboratorio su campioni, Bergamo;
- [5] Italcementi, 10/05/1989, Impianto idroelettrico di Olmo, al Brembo, Diga di Cassiglio: Esecuzione del nuovo sistema drenante e installazione piezometri in fondazione, Bergamo;
- [6] Rodio, 10/10/1989, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo Diga di Cassiglio: Interventi di impermeabilizzazione, Villa d'Adda (BG);
- [7] Ismes, 1993, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Studio dell'imput sismico, Bergamo;
- [8] Ismes, 13/11/1995, Impianto idroelettrico di Olmo, al Brembo, Diga di Cassiglio: Rilievi con sonda televisiva in fori di sondaggio, Bergamo;
- [9] C.T.G. Italcementi, 1996, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: interpretazione del rilievo con sonda televisiva effettuato da Ismes nei fori di sondaggio, Bergamo;
- [11] So.ge.tec, 01/03/2005, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Sondaggi e prove di permeabilità, Seriate (BG);

- [12] SiAl.Tec, 07/04/2005, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Prove dilatometriche e di laboratorio su roccia, Bergamo;
- [13] C.T.G. Italcementi, 02/05/2005, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Indagini geostrukturali e geomeccaniche sulla roccia di fondazione, Bergamo;
- [14] Alberti F., 2009, Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo, Diga di Cassiglio: Invaso di Cassiglio (BG) Indagine geologica relativa alla valutazione delle condizioni di stabilità delle sponde e alla stima della distribuzione granulometrica dei depositi al suo interno, Darfo Boario Terme (BS);
- [15] P&P, 2018, Diga di Cassiglio – Verifiche della sicurezza, Sreiate (BG);

## 14 BIBLIOGRAFIA

- [16] Hoek, Carranza-Torres, Corkum, 2002. Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proc NARMS-TAC Conference, Toronto 2002.
- [17] Hoek, Diederichs, 2006. Empirical estimation of rock mass modulus. Rock Mechanics and Mining Sciences 43 (2006).
- [18] Barton, 1982, Shear Strength Investigations for Surface Mining, Proc. Stability in Surface Mining Volume 3, American Society of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers;
- [19] Lombardi 2002, Grouting of rock masses. 3<sup>rd</sup> International Conference on Grouting and Grout Treatment;

## 15 APPENDICE 1 – CALCOLI DI PORTANZA - SOLUZIONE CHIUSA





## Simbologia

f, F: forza distribuita e forza totale applicate dalla diga alla roccia di fondazione

$\beta$ : inclinazione di F rispetto alla verticale ( + verso valle)

W: peso del blocco di roccia

Kv, kh: coefficienti sismici

Ua, Ub: forze equivalenti alle pressioni interstiziali agenti nei giunti

P: pressione idrostatica agente sulla parte di cuneo posta a monte dello schermo impermeabilizzante

## Dati del problema

$$\gamma_{\text{ROCK}} = 27 \text{ kN/m}^3$$

$$u_1 = 200 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 20 \text{ kPa}$$

$$D = 17.9 \text{ m}$$

## Dimensioni geometriche

$$H = D * \tan \alpha$$

$$A = D / \cos \alpha$$

$$B = H / \cos \alpha$$

$$L = A / \cos \alpha$$

Spessore unitario in direzione fuori piano

## Azioni

$$W = 0.5 * A * B * \gamma_{\text{ROCK}} * (1 - k_v)$$

$$W_a = W * \cos \alpha$$

$$W_b = W * \sin \alpha$$

$$U_a = u_0 + 0.5 * A * H * \gamma_w$$

$$U_b = u_1 + 0.5 * B * H * \gamma_w$$

$$P = u_1 * (L - D)$$

$$F_t = F * \sin (\beta - \alpha)$$

$$F_n = F * \cos (\beta - \alpha)$$

$$V = F_t + W * k_h * \cos \alpha + U_b - W_b - P * \sin \alpha$$

$$N' = F_n + W * k_h * \sin \alpha - U_a + W_a + P * \cos \alpha$$

**Resistenza al taglio del giunto St**

$$R = N' * \tan \phi$$

$\phi$ : angolo di attrito del giunto St

**Fattore di sicurezza**

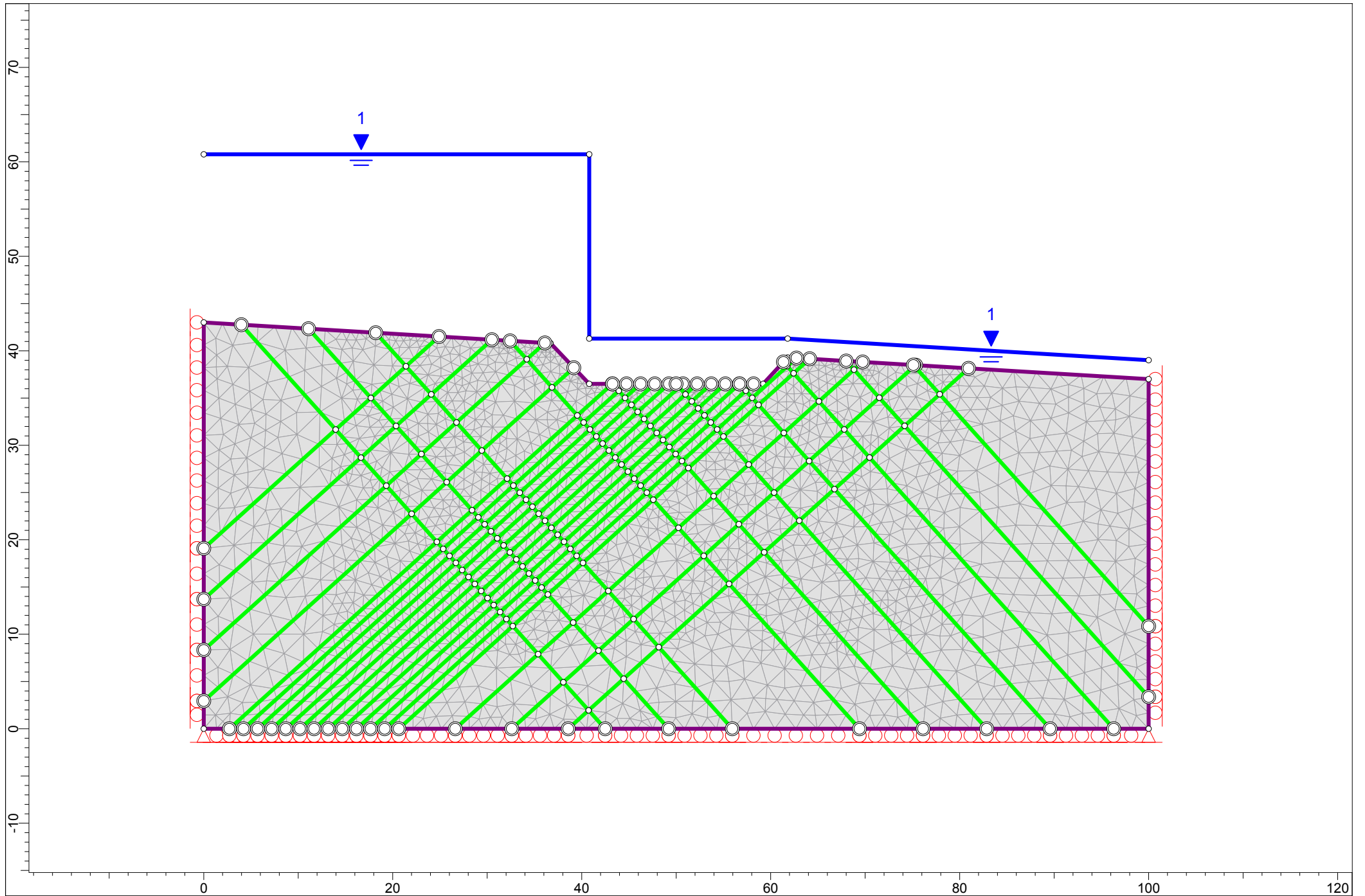
Nel caso che sia  $V > 0$ ,  $N' > 0$ , il cuneo di roccia ha un fattore di sicurezza è dato dall'equazione:

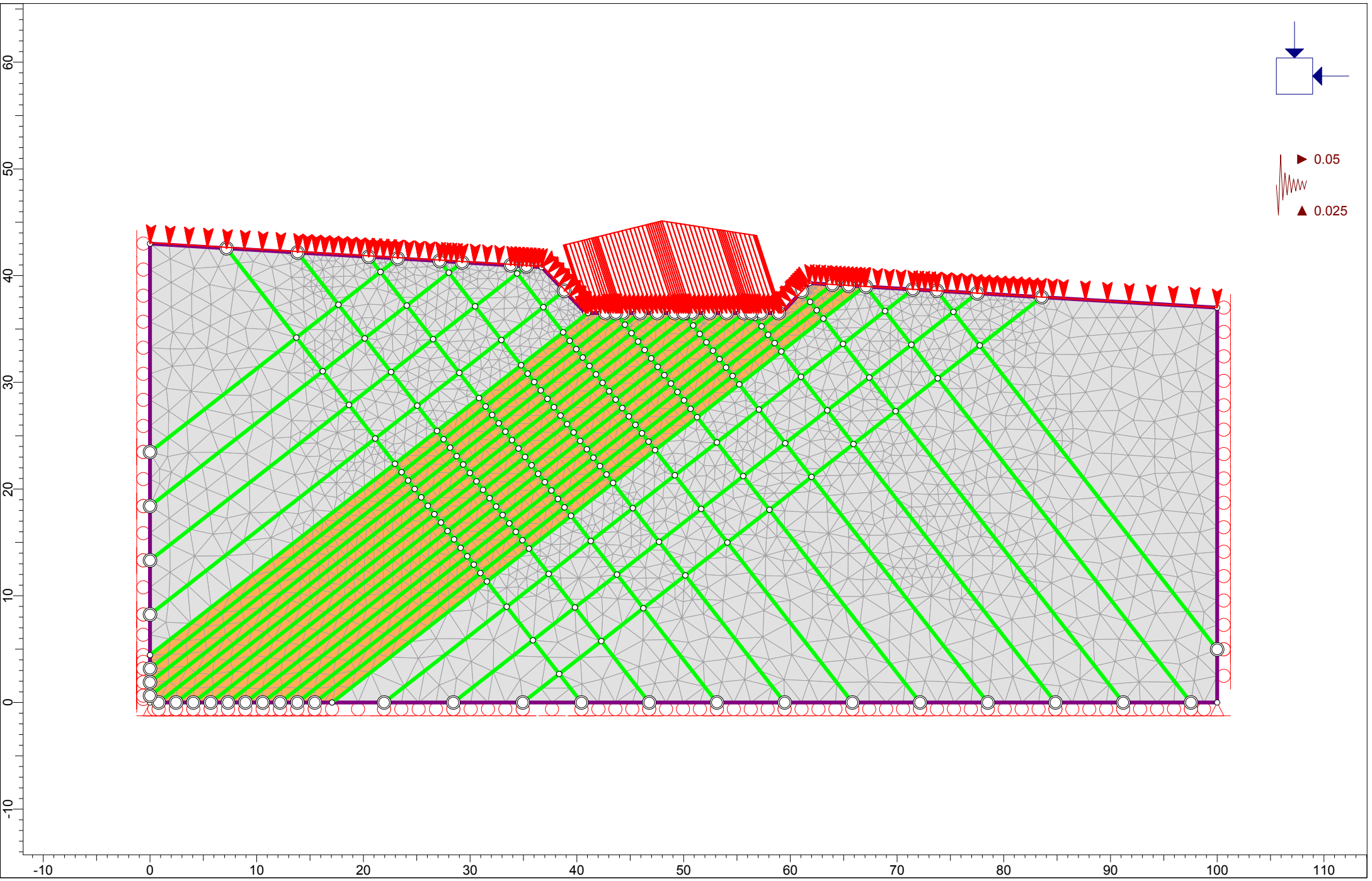
$$FS = R / V$$

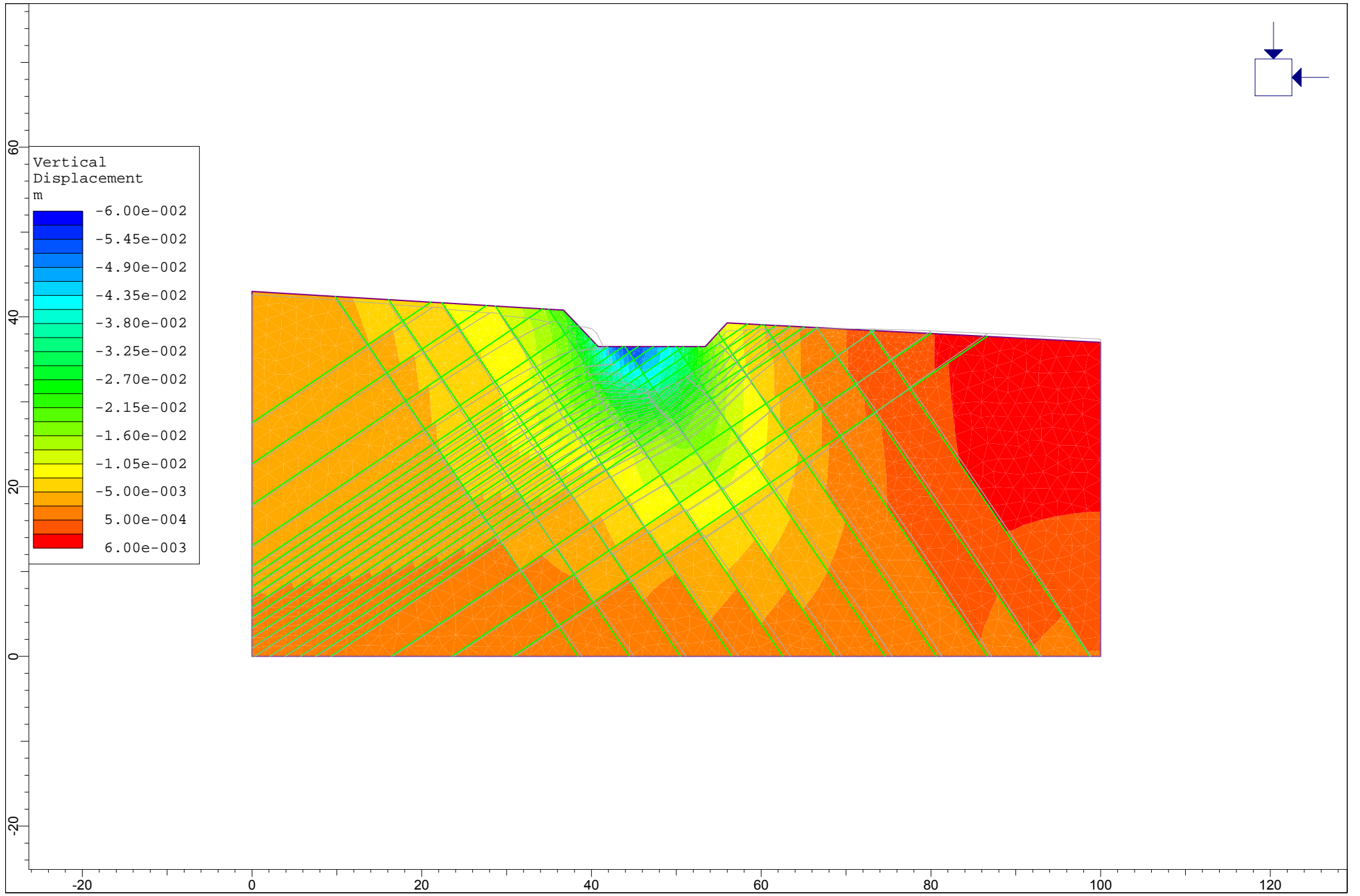
Se è  $V < 0$ ,  $N' > 0$ , la forza mobilizzante è negativa, cioè stabilizzante; il cuneo di roccia è stabile.

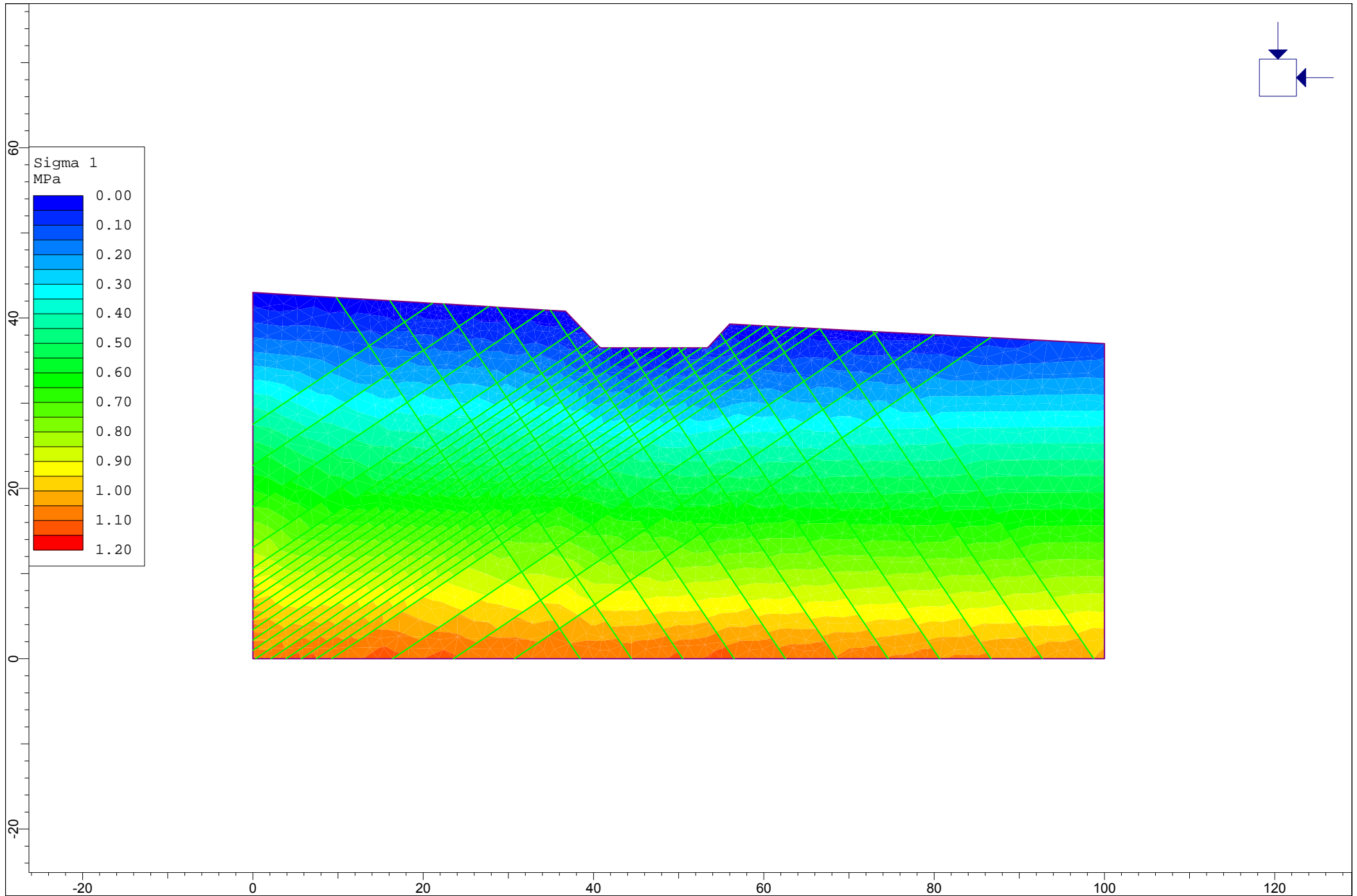
## 16 APPENDICE 2 – FIGURE ANALISI FEM

CASSIGLIO SEZIONE A - DISCRETIZZAZIONE, PIEZOMETRICA, VINCOLI

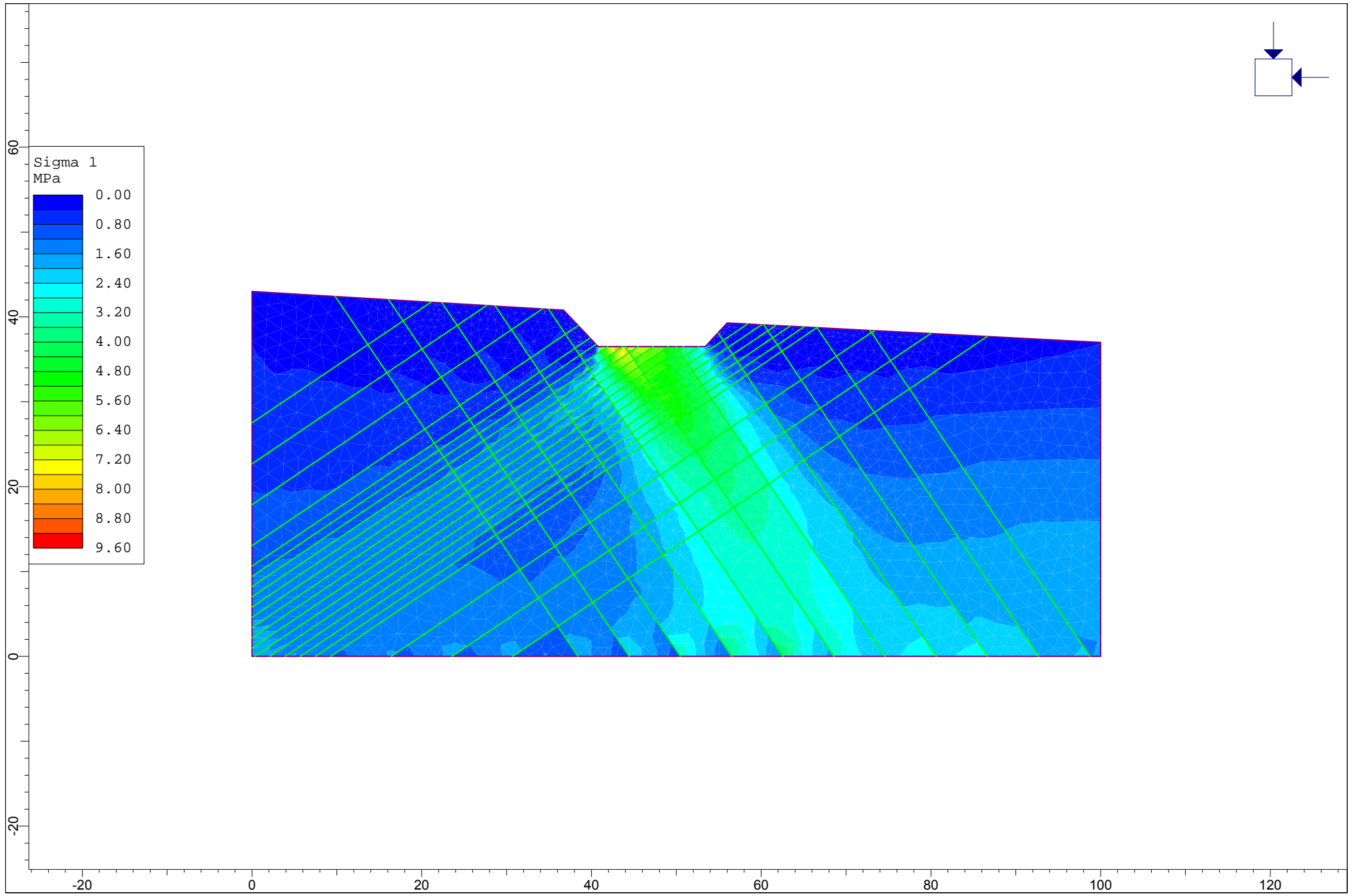










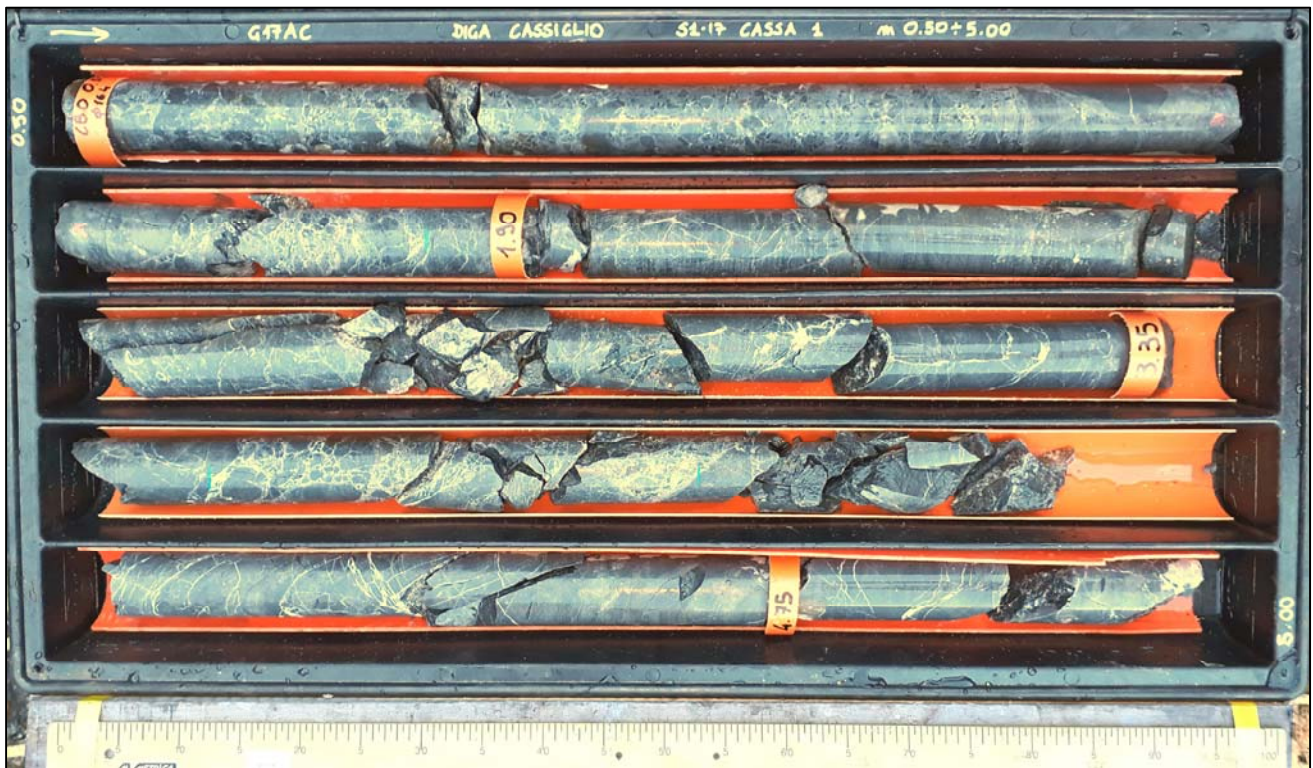


**17 APPENDICE 3 – SONDAGGI S1 , S2 – 2017 - FOTOGRAFIE , STRATIGRAFIE,  
CLASSIFICAZIONI TECNICHE**

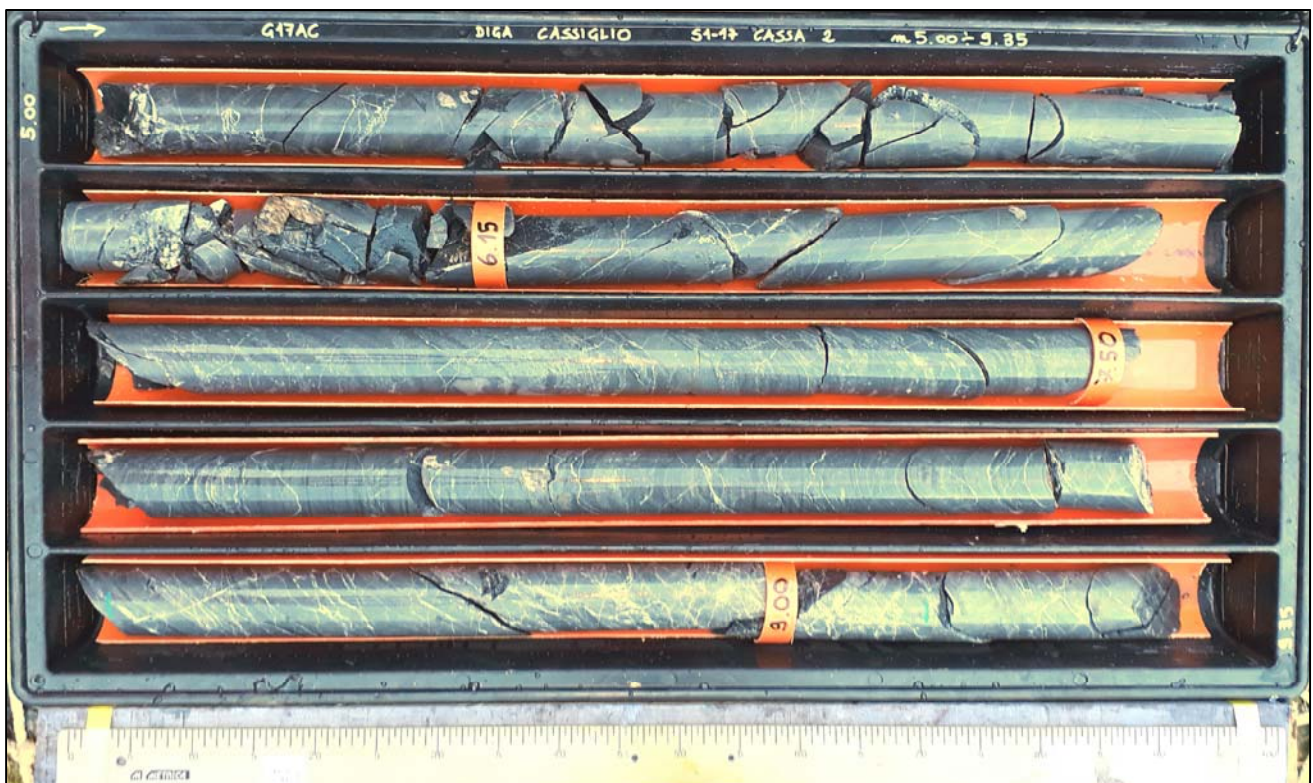
Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S1-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 1  
Profondità (m da p.c.): 0.50 - 5.00



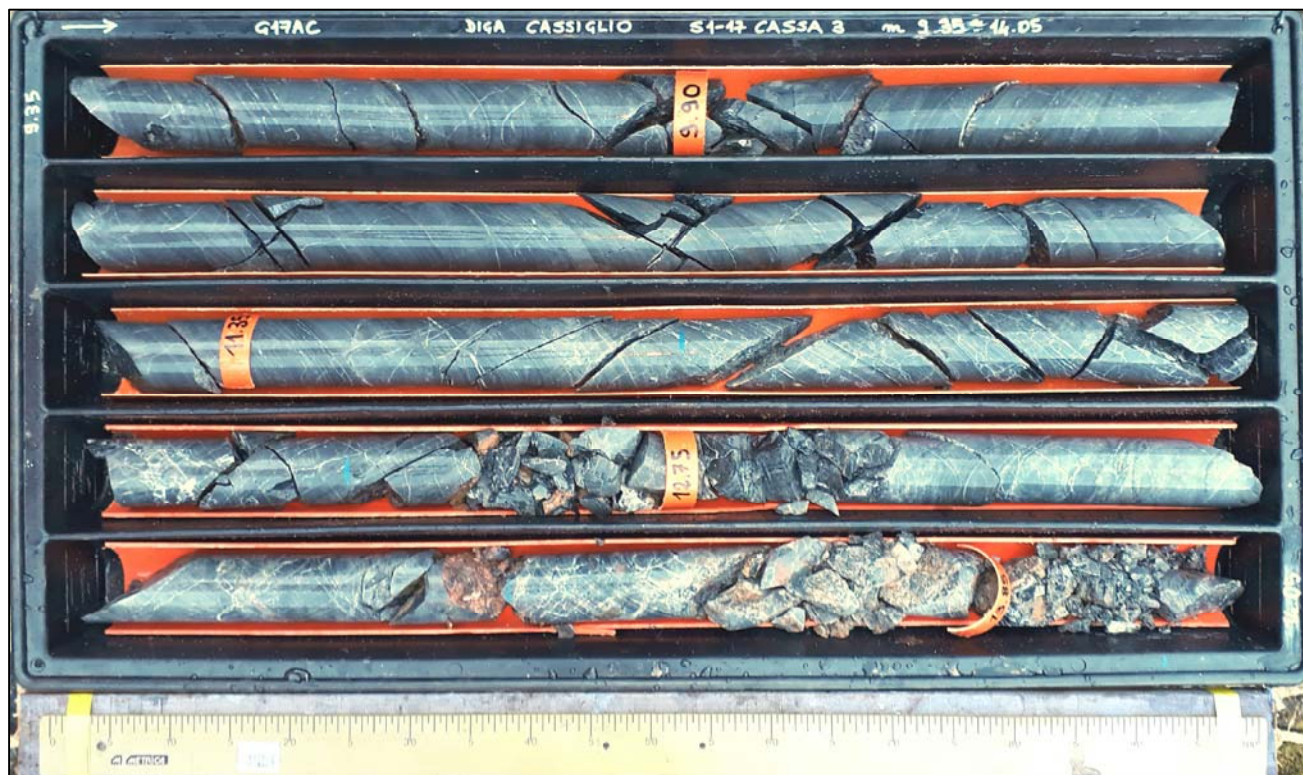
CASSA: 2  
Profondità (m da p.c.): 5.00 - 9.35



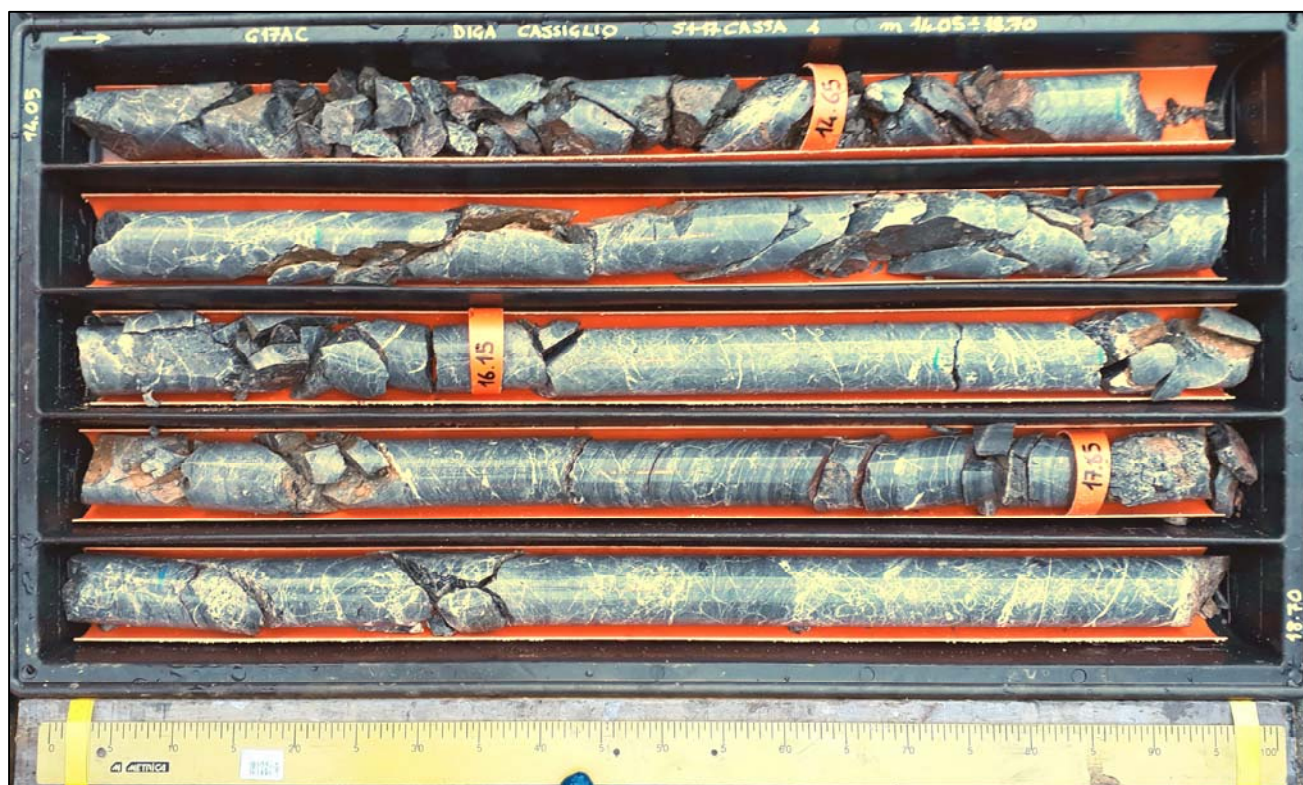
Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S1-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 3  
Profondità (m da p.c.): 9.35 - 14.05



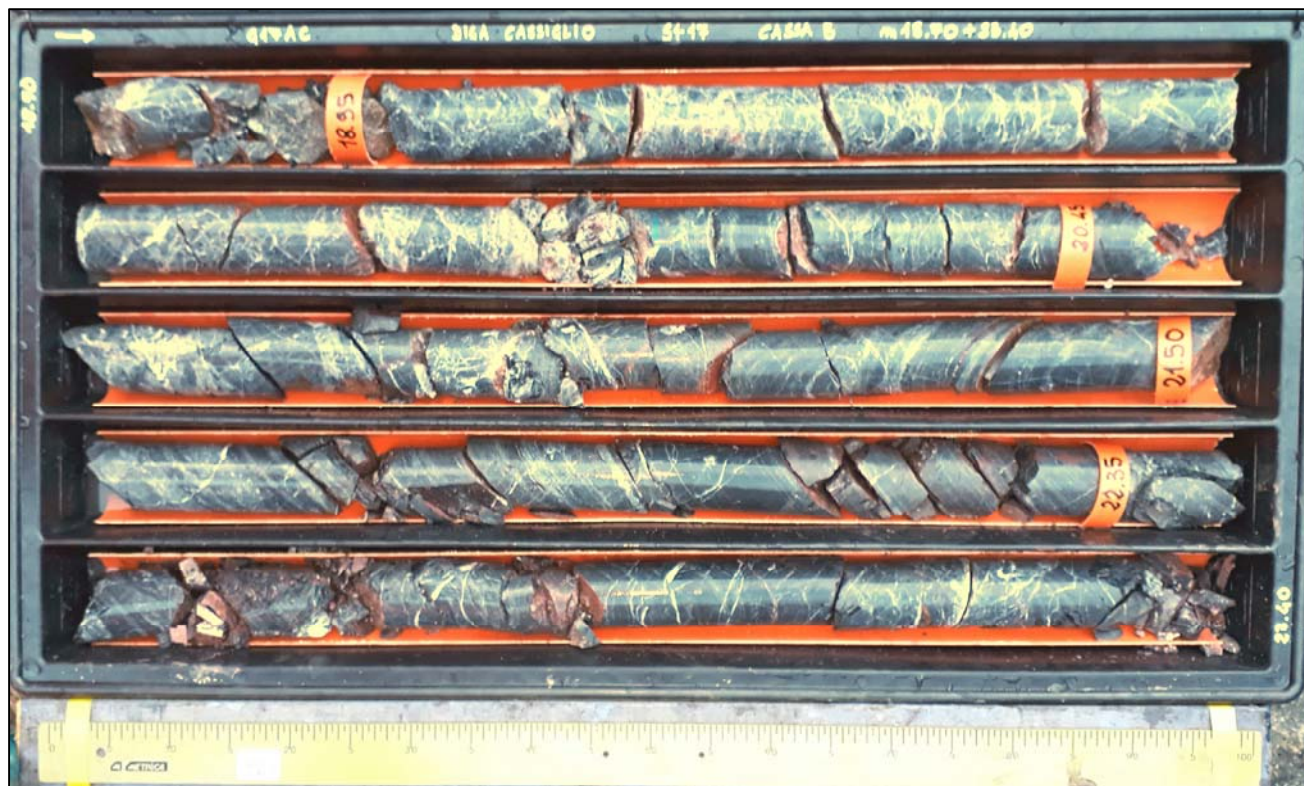
CASSA: 4  
Profondità (m da p.c.): 14.05 - 18.70



Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S1-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 5  
Profondità (m da p.c.): 18.70 - 23.40



CASSA: 6  
Profondità (m da p.c.): 23.40 - 25.10













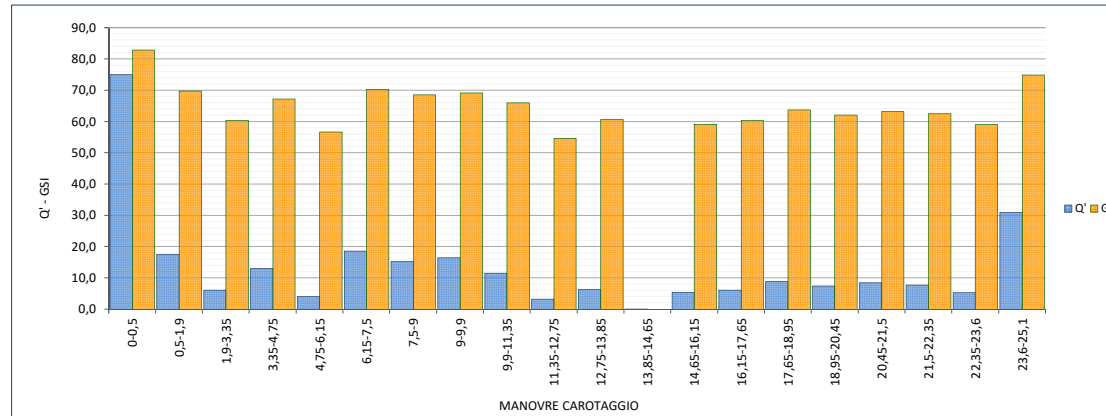
**DIGA DI CASSIGLIO - SONDAGGIO S1-17**

Nome Sondaggio	Manovra [m]	Lunghezza Manovra	Lunghezza misurata	Recupero	RQD %	Frequenza Fratture [1/m]	Numero di Set Fratture	Rugosità	FRAC T.	Riempimento/alterazione	Jn	Jr	Ja	RQD/Jn	Jr/Ja	Q'	GSI	MEDIA MOBILE (3)	MEDIA MOBILE (5)	Q' MEDIA PESATA	GSI MEDIA PESATA
S1-17	0,00 - 0,50	0,50	0,50	100	100,0	2,0	1	Rough Planar	1	-	2	1,5	1	50,00	1,5	<b>75,0</b>	<b>82,9</b>			37,5	41,4
S1-17	0,50 - 1,90	1,40	1,40	100	94,0	2,1	2	Rough Planar	3	Dol	4	1,5	2	23,50	0,8	<b>17,6</b>	<b>69,8</b>	71,0	70,0	24,7	97,8
S1-17	1,90 - 3,35	1,45	1,45	100	73,8	5,5	3	Rough Planar	8	Dol	9	1,5	2	8,20	0,8	<b>6,2</b>	<b>60,3</b>	65,8	67,4	8,9	87,5
S1-17	3,35 - 4,75	1,40	1,40	100	70,0	7,1	2	Rough Planar	10	Dol	4	1,5	2	17,50	0,8	<b>13,1</b>	<b>67,2</b>	61,4	64,9	18,4	94,0
S1-17	4,75 - 6,15	1,40	1,40	100	49,3	12,1	3	Rough Planar	17	Dol	9	1,5	2	5,48	0,8	<b>4,1</b>	<b>56,7</b>	64,7	64,6	5,8	79,4
S1-17	6,15 - 7,50	1,35	1,35	100	99,2	3,7	2	Rough Planar	5	Dol	4	1,5	2	24,80	0,8	<b>18,6</b>	<b>70,3</b>	65,2	66,4	25,1	94,9
S1-17	7,50 - 9,00	1,50	1,50	100	81,3	4,7	2	Rough Planar	7	Dol	4	1,5	2	20,33	0,8	<b>15,2</b>	<b>68,5</b>	69,3	66,1	22,9	102,8
S1-17	9,00 - 9,90	0,90	0,90	100	87,7	12,2	2	Rough Planar	11	Dol	4	1,5	2	21,93	0,8	<b>16,4</b>	<b>69,2</b>	67,9	65,7	14,8	62,3
S1-17	9,90 - 11,35	1,45	1,45	100	61,4	11,0	2	Rough Planar	16	Dol	4	1,5	2	15,35	0,8	<b>11,5</b>	<b>66,0</b>	63,3	63,8	16,7	95,7
S1-17	11,35 - 12,75	1,40	1,40	100	39,2	10,7	3	Rough Planar	15	Dol	9	1,5	2	4,36	0,8	<b>3,3</b>	<b>54,7</b>	60,4	50,1	4,6	76,5
S1-17	12,75 - 13,85	1,10	1,10	100	50,9	10,9	2	Rough Planar	12	argilla	4	1,5	3	12,73	0,5	<b>6,4</b>	<b>60,7</b>	38,4	48,1	7,0	66,7
S1-17	13,85 - 14,65	0,80	0,80	100	0,0	16,3	2	Rough Planar	13	ossid. + argilla	4	1,5	3	0,00	0,5	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	39,9	47,0	0,0	0,0
S1-17	14,65 - 16,15	1,50	1,50	100	43,0	10,0	2	Rough Planar	15	ossid. + argilla	4	1,5	3	10,75	0,5	<b>5,4</b>	<b>59,1</b>	39,8	48,8	8,1	88,7
S1-17	16,15 - 17,65	1,50	1,50	100	49,1	8,7	2	Rough Planar	13	ossid. + argilla	4	1,5	3	12,28	0,5	<b>6,1</b>	<b>60,3</b>	61,1	49,1	9,2	90,5
S1-17	17,65 - 18,95	1,30	1,30	100	71,5	6,9	2	Rough Planar	9	ossid. + argilla	4	1,5	3	17,88	0,5	<b>8,9</b>	<b>63,7</b>	62,1	61,7	11,6	82,8
S1-17	18,95 - 20,45	1,50	1,50	100	60,0	12,0	2	Rough Planar	18	ossid. + argilla	4	1,5	3	15,00	0,5	<b>7,5</b>	<b>62,1</b>	63,0	62,4	11,3	93,2
S1-17	20,45 - 21,50	1,05	1,05	100	67,6	9,5	2	Rough Planar	10	ossid. + argilla	4	1,5	3	16,90	0,5	<b>8,5</b>	<b>63,2</b>	62,6	62,1	8,9	66,4
S1-17	21,50 - 22,35	0,85	0,85	100	62,4	15,3	2	Rough Planar	13	argilla	4	1,5	3	15,60	0,5	<b>7,8</b>	<b>62,5</b>	61,6	64,3	6,6	53,1
S1-17	22,35 - 23,60	1,25	1,25	100	42,4	11,2	2	Rough Planar	14	argilla	4	1,5	3	10,60	0,5	<b>5,3</b>	<b>59,0</b>	65,5	64,9	6,6	73,8
S1-17	23,60 - 25,10	1,50	1,50	100	82,6	9,3	2	Rough Planar	14	-	4	1,5	1	20,65	1,5	<b>31,0</b>	<b>74,9</b>	67,0	65,5	46,5	112,3

Q' MEDIA PESATA	GSI MEDIA PESATA
37,5	41,4
24,7	97,8
8,9	87,5
18,4	94,0
5,8	79,4
25,1	94,9
22,9	102,8
14,8	62,3
16,7	95,7
4,6	76,5
7,0	66,7
0,0	0,0
8,1	88,7
9,2	90,5
11,6	82,8
11,3	93,2
8,9	66,4
6,6	53,1
6,6	73,8
46,5	112,3
<b>11,8</b>	<b>62,1</b>

64

INT. QUOTA	Q'	GSI
0-0,5	75,0	82,9
0,5-1,9	17,6	69,8
1,9-3,35	6,2	60,3
3,35-4,75	13,1	67,2
4,75-6,15	4,1	56,7
6,15-7,5	18,6	70,3
7,5-9	15,2	68,5
9-9,9	16,4	69,2
9,9-11,35	11,5	66,0
11,35-12,75	3,3	54,7
12,75-13,85	6,4	60,7
13,85-14,65	0,0	0,0
14,65-16,15	5,4	59,1
16,15-17,65	6,1	60,3
17,65-18,95	8,9	63,7
18,95-20,45	7,5	62,1
20,45-21,5	8,5	63,2
21,5-22,35	7,8	62,5
22,35-23,6	5,3	59,0
23,6-25,1	31,0	74,9



$GSI = 9 * \ln Q' + 44$

$Q' = (RQD/Jn) * (Jr/Ja)$

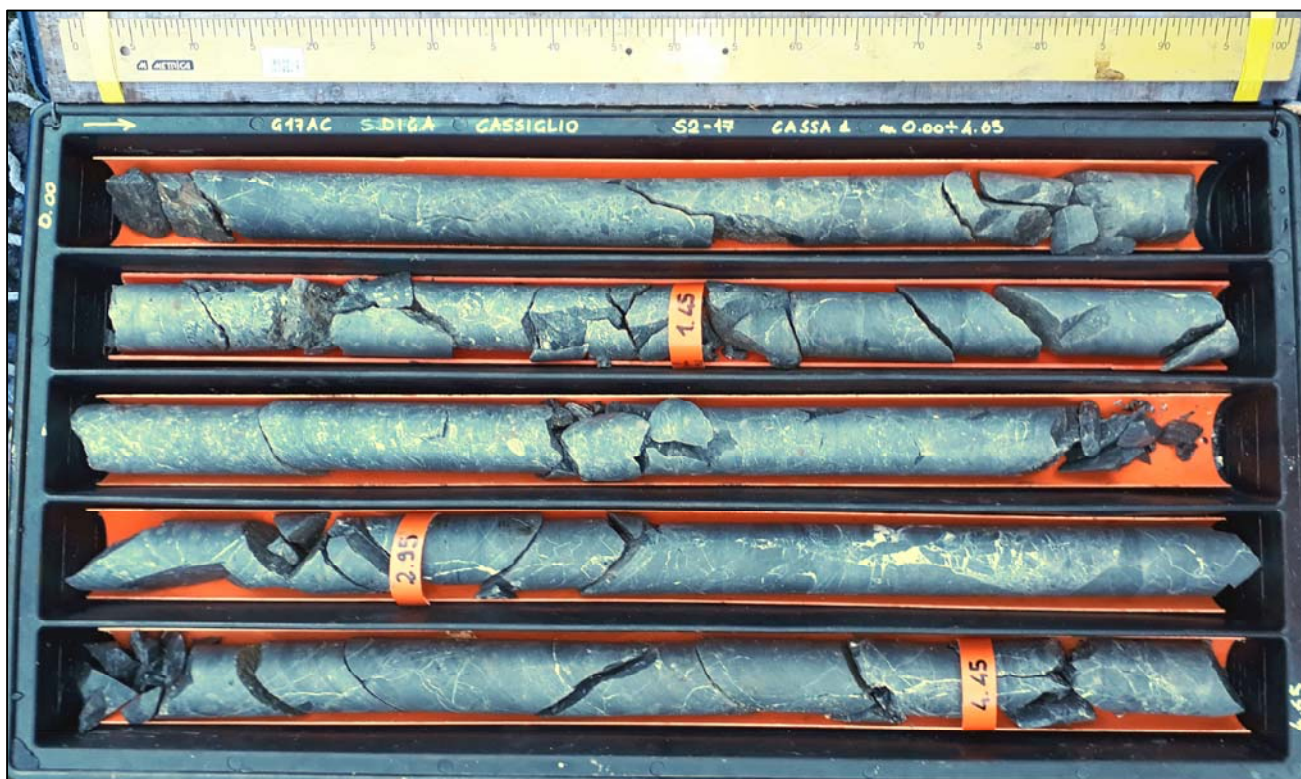
$Q = Q' * (Jw/SRF)$

$Q' = \exp[(GSI-44)/9]$

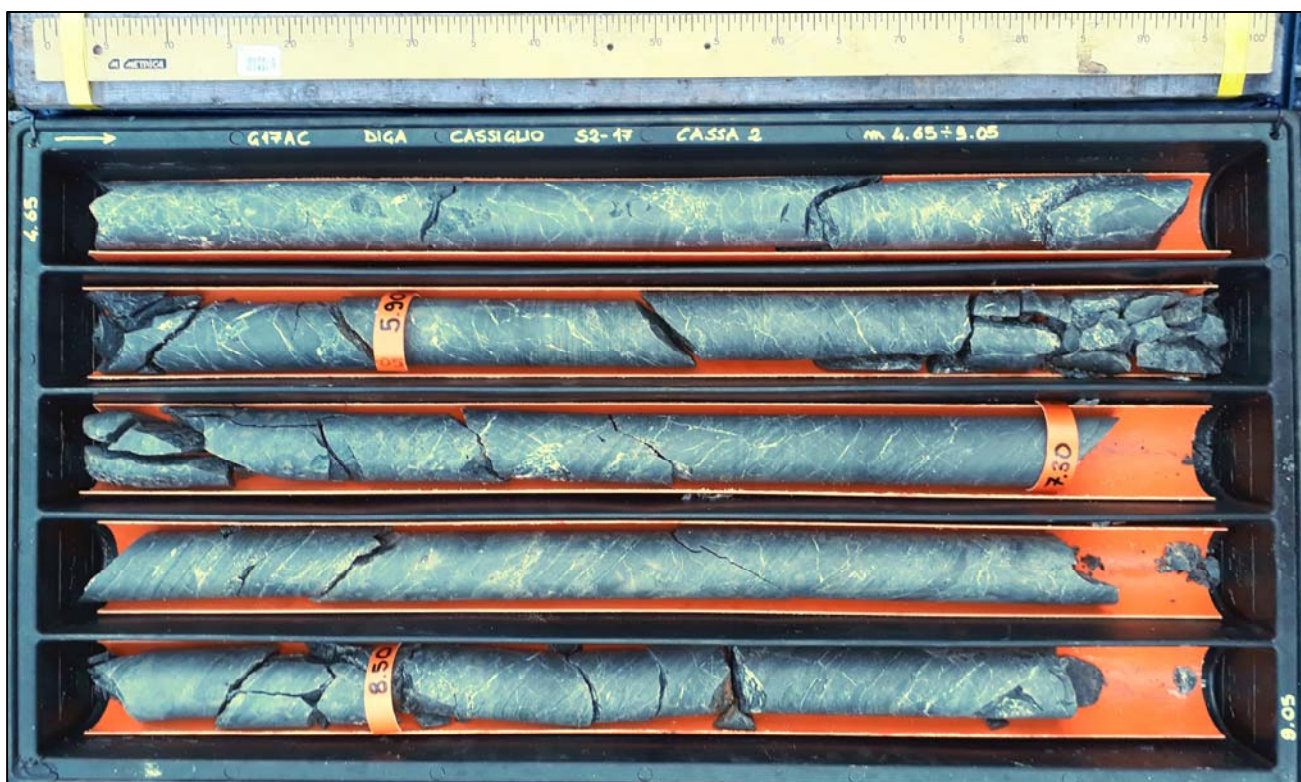
Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S2-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 1  
Profondità (m da p.c.): 0.00 - 4.65



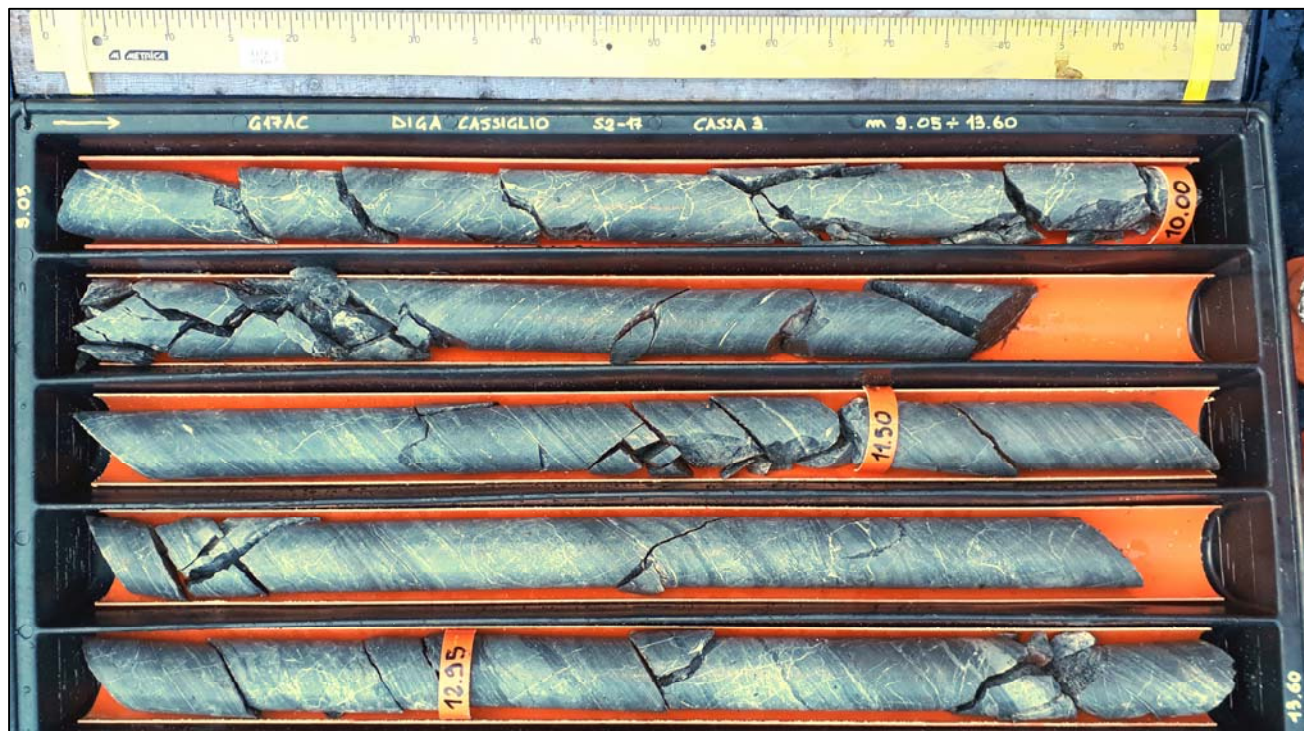
CASSA: 2  
Profondità (m da p.c.): 4.65 - 9.05



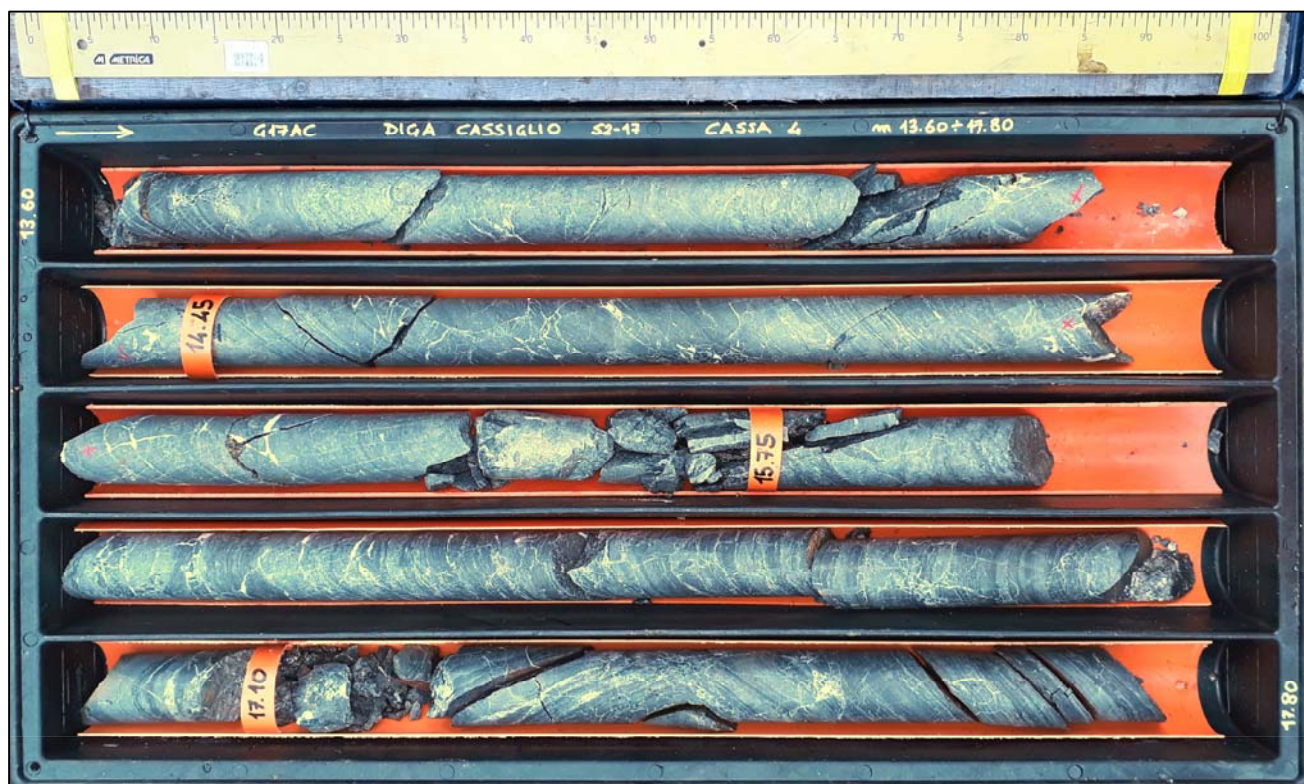
Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S2-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 3  
Profondità (m da p.c.): 9.05 - 13.60



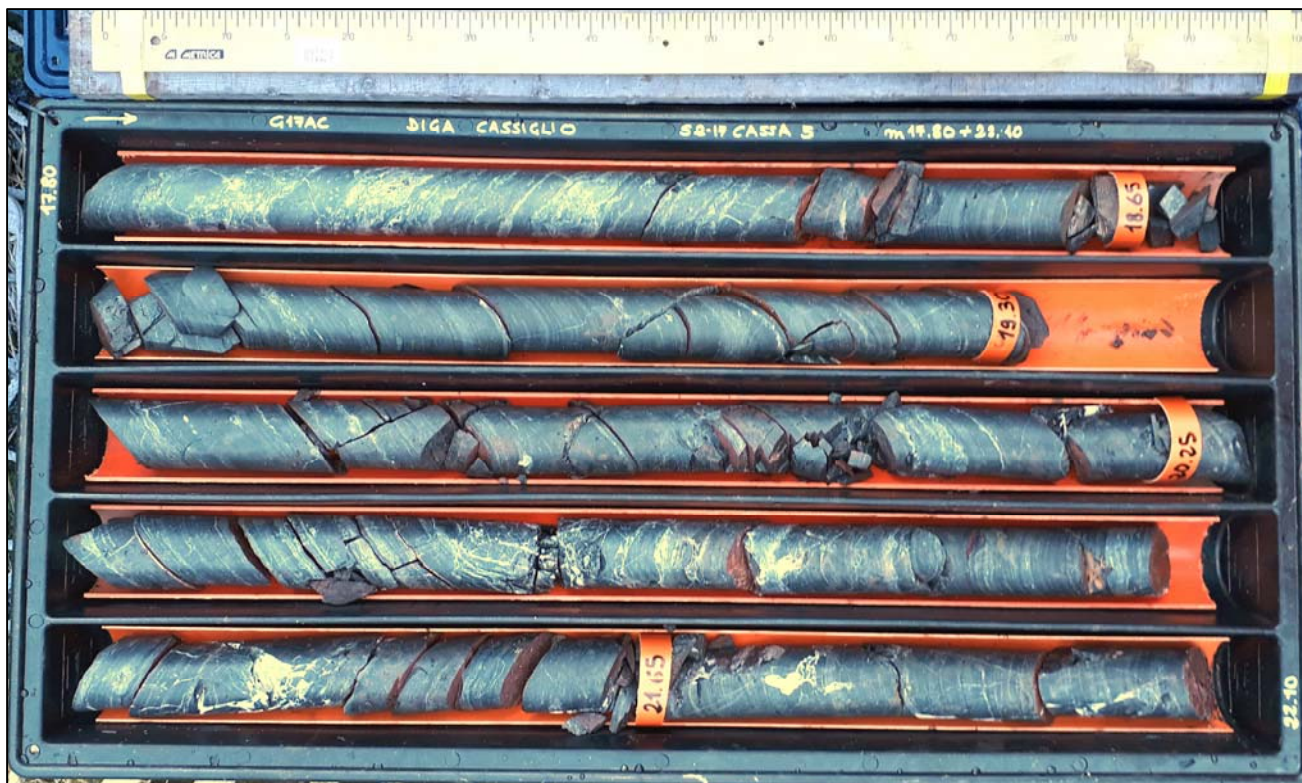
CASSA: 4  
Profondità (m da p.c.): 13.60 - 17.80



Committente: ITALGEN SPA  
Cantiere: DIGA DI CASSIGLIO - BG -  
SONDAGGIO: S2-17

DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

CASSA: 5  
Profondità (m da p.c.): 17.80 - 22.10



CASSA: 6  
Profondità (m da p.c.): 22.10 - 23.50



metodo di perforazione	attrezzo di perforazione	tipo corona	rivestimento	campioni	profondità (m)	stratigrafia	descrizione	RQD (%)		recupero campioni (%)		manovra di carotaggio	tipo discontinuità	quota (m)	inclinazione (°)	caratteristiche discontinuità
								20	40	60	80					
ROTAZIONE	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			0.00 - 1.30		0.00 - 1.30 Breccia dolomitica ben cementata, clasti grigi e grigio scuri (nessuna gradazione o selezione, struttura caotica) in matrice dolomitica fine. Vene di dolomite attorno ai clasti.	44.0%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			1.30 - 3.43		1.30 - 3.43 Dolomia grigio scura, visibili tracce di fossili ricristallizzate. Visibile andamento della stratificazione, serrata, solo localmente si apre all'estrusione dal carotiere. Talvolta St spalmata di dolomite.	47.3%		100%	1.45					
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			3.43 - 3.55		3.43 - 3.55 Breccia dolomitica ben cementata (rif. descrizione più sopra). La breccia è delimitata tra una St e una K1.	62.0%		100%	2.95					
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			3.55 - 4.58		3.55 - 4.58 Dolomia grigio scura. Visibile andamento della stratificazione, serrata, solo localmente si apre all'estrusione dal carotiere. Talvolta St spalmata di dolomite.				4.45					
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			4.58 - 5.15		4.58 - 5.15 Dolomia grigio scura con reticolo di vene di dolomite.									
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			5.15 - 5.23		5.15 - 5.23 Breccia dolomitica ben cementata (rif. descrizione più sopra).	73.1%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			5.23 - 7.25		5.23 - 7.25 Dolomia grigio scura. Visibile andamento della stratificazione, serrata, solo localmente si apre all'estrusione dal carotiere. Talvolta St spalmata di dolomite.				5.90					
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			7.25 - 9.05		7.25 - 9.05 Dolomia grigio scura con dolomite, lungo St.	78.6%		100%						
T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			7.25 - 8.0			71.7%		100%	7.30						

metodo di perforazione	attrezzo di perforazione	tipo corona	rivestimento	campioni	profondità (m)	stratigrafia	descrizione	RQD (%)		recupero campioni (%)		manovra di carotaggio	tipo discontinuità	quota (m)	inclinazione (°)	caratteristiche discontinuità
								20	40	60	80					
ROTAZIONE	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANT.			8.50			71.7%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			9.05	9.05 - 9.90	Dolomia grigio scura con reticolo di vene di dolomite.	74.0%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			10.00	9.90 - 13.74	Dolomia grigio scura. Visibile andamento della stratificazione, serrata, localmente ossidata o con velo di dolomite.	58.7%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			11.50			83.4%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			12.95			86.0%		100%						
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			14.45	13.74 - 14.45	Dolomia grigio scura. Poco visibile l'andamento della stratificazione.									
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			14.82	14.45 - 14.82	Dolomia grigio scura. Visibile andamento della stratificazione, serrata, localmente ossidata o con velo di dolomite.									
	T2 Ø 76mm	CORONA DIAMANTATA			15.75	14.82 - 14.91	Breccia dolomitica ben cementata (rif. descrizione più sopra).	73.8%		100%						
					16.00	14.91 - 17.65	Dolomia grigio scura. Visibile andamento della stratificazione, serrata, localmente ossidata o con velo di dolomite.	87.4%		100%						







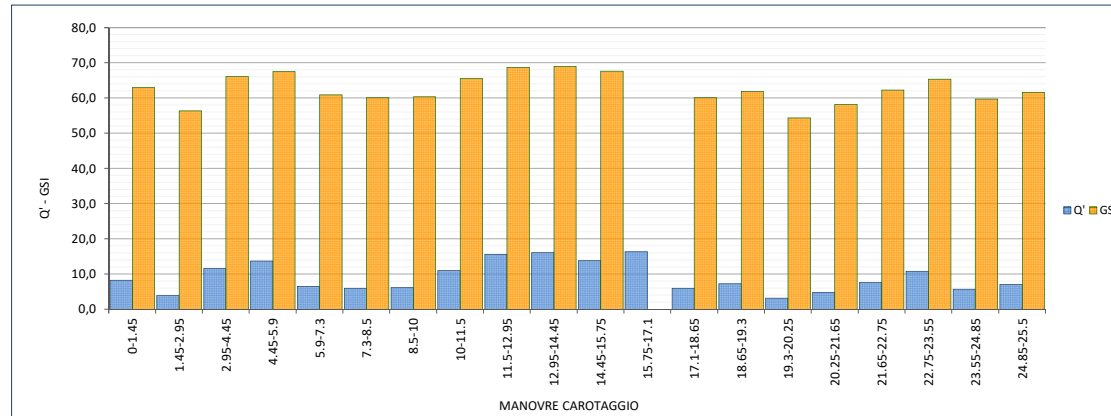
DIGA DI CASSIGLIO - SONDAGGIO S2-17

Nome Sondaggio	Manovra [m]	Lunghezza Manovra	Lunghezza misurata	Recupero	RQD %	Frequenza Fratture [1/m]	Numero di Set Fratture	Rugosità	FRAC T.	Riempimento/alterazione	Jn	Jr	Ja	RQD/Jn	Jr/Ja	Q'	GSI	MEDIA MOBILE (3)	MEDIA MOBILE (5)
S2-17	0,00 - 1,45	1,45	1,45	100	44,0	2,8	2	Rough Planar	4	Dol	4	1,5	2	11,00	0,8	<b>8,3</b>	<b>63,0</b>		
S2-17	1,45 - 2,95	1,50	1,50	100	47,3	4,7	3	Rough Planar	7	Dol	9	1,5	2	5,26	0,8	<b>3,9</b>	<b>56,3</b>	61,8	63,2
S2-17	2,95 - 4,45	1,50	1,50	100	62,0	5,3	2	Rough Planar	8	Dol	4	1,5	2	15,50	0,8	<b>11,6</b>	<b>66,1</b>	63,3	62,8
S2-17	4,45 - 5,90	1,45	1,45	100	73,1	2,8	2	Rough Planar	4	Dol	4	1,5	2	18,28	0,8	<b>13,7</b>	<b>67,6</b>	64,9	62,2
S2-17	5,90 - 7,30	1,40	1,40	100	78,6	2,1	3	Rough Planar	3	Dol	9	1,5	2	8,73	0,8	<b>6,6</b>	<b>60,9</b>	62,9	63,0
S2-17	7,30 - 8,50	1,20	1,20	100	71,7	5,8	3	Rough Planar	7	Dol	9	1,5	2	7,97	0,8	<b>6,0</b>	<b>60,1</b>	60,5	62,9
S2-17	8,50 - 10,00	1,50	1,50	100	74,0	5,3	3	Rough Planar	8	Dol	9	1,5	2	8,22	0,8	<b>6,2</b>	<b>60,4</b>	62,0	63,1
S2-17	10,00 - 11,50	1,50	1,50	100	58,7	7,3	2	Rough Planar	11	Dol + ossid.	4	1,5	2	14,68	0,8	<b>11,0</b>	<b>65,6</b>	64,9	64,8
S2-17	11,50 - 12,95	1,45	1,45	100	83,4	6,2	2	Rough Planar	9	Dol + ossid.	4	1,5	2	20,85	0,8	<b>15,6</b>	<b>68,7</b>	67,8	66,3
S2-17	12,95 - 14,45	1,50	1,50	100	86,0	4,7	2	Rough Planar	7	Dol + ossid.	4	1,5	2	21,50	0,8	<b>16,1</b>	<b>69,0</b>	68,5	68,0
S2-17	14,45 - 15,75	1,30	1,30	100	73,8	3,1	2	Rough Planar	4	Dol	4	1,5	2	18,45	0,8	<b>13,8</b>	<b>67,6</b>	68,6	66,9
S2-17	15,75 - 17,10	1,35	1,35	100	87,4	4,4	2	Rough Planar	6	Dol	4	1,5	2	21,85	0,8	<b>16,4</b>	<b>69,2</b>	65,7	65,6
S2-17	17,10 - 18,65	1,55	1,55	100	72,2	6,5	2	Smooth Planar	10	ossid. + argilla	4	1	3	18,05	0,3	<b>6,0</b>	<b>60,2</b>	63,7	62,6
S2-17	18,65 - 19,30	0,65	0,65	100	58,5	15,4	2	Rough Planar	10	ossid. + argilla	4	1,5	3	14,63	0,5	<b>7,3</b>	<b>61,9</b>	58,8	60,7
S2-17	19,30 - 20,25	0,95	0,95	100	37,9	12,6	2	Smooth Planar	12	ossid. + argilla	4	1	3	9,48	0,3	<b>3,2</b>	<b>54,4</b>	58,1	59,4
S2-17	20,25 - 21,65	1,40	1,40	100	38,6	12,9	2	Rough Planar	18	ossid. + argilla	4	1,5	3	9,65	0,5	<b>4,8</b>	<b>58,2</b>	58,3	60,4
S2-17	21,65 - 22,75	1,10	1,10	100	60,9	12,7	2	Rough Planar	14	argilla	4	1,5	3	15,23	0,5	<b>7,6</b>	<b>62,3</b>	61,9	60,0
S2-17	22,75 - 23,55	0,80	0,80	100	86,2	10,0	2	Rough Planar	8	argilla	4	1,5	3	21,55	0,5	<b>10,8</b>	<b>65,4</b>	62,5	61,5
S2-17	23,55 - 24,85	1,30	1,30	100	61,5	12,3	2	Rough Planar	16	argilla	4	1,5	4	15,38	0,4	<b>5,8</b>	<b>59,8</b>	62,3	62,3
S2-17	24,85 - 25,50	0,65	0,65	100	56,9	6,2	2	Rough Planar	4	Dol + argilla	4	1,5	3	14,23	0,5	<b>7,1</b>	<b>61,7</b>	60,7	62,3

Q' MEDIA PESATA	GSI MEDIA PESATA
12,0	91,3
5,9	84,5
17,4	99,1
19,9	98,0
9,2	85,3
7,2	72,1
9,3	90,6
16,5	98,4
22,7	99,7
24,2	103,5
18,0	87,9
22,1	93,4
9,3	93,2
4,8	40,2
3,0	51,6
6,8	81,4
8,4	68,5
8,6	52,3
7,5	77,7
4,6	40,1
<b>9,3</b>	<b>63,1</b>

66

INT. QUOTA	Q'	GSI
0-1.45	8,3	63,0
1.45-2.95	3,9	56,3
2.95-4.45	11,6	66,1
4.45-5.9	13,7	67,6
5.9-7.3	6,6	60,9
7.3-8.5	6,0	60,1
8.5-10	6,2	60,4
10-11.5	11,0	65,6
11.5-12.95	15,6	68,7
12.95-14.45	16,1	69,0
14.45-15.75	13,8	67,6
15.75-17.1	16,4	0,0
17.1-18.65	6,0	60,2
18.65-19.3	7,3	61,9
19.3-20.25	3,2	54,4
20.25-21.65	4,8	58,2
21.65-22.75	7,6	62,3
22.75-23.55	10,8	65,4
23.55-24.85	5,8	59,8
24.85-25.5	7,1	61,7



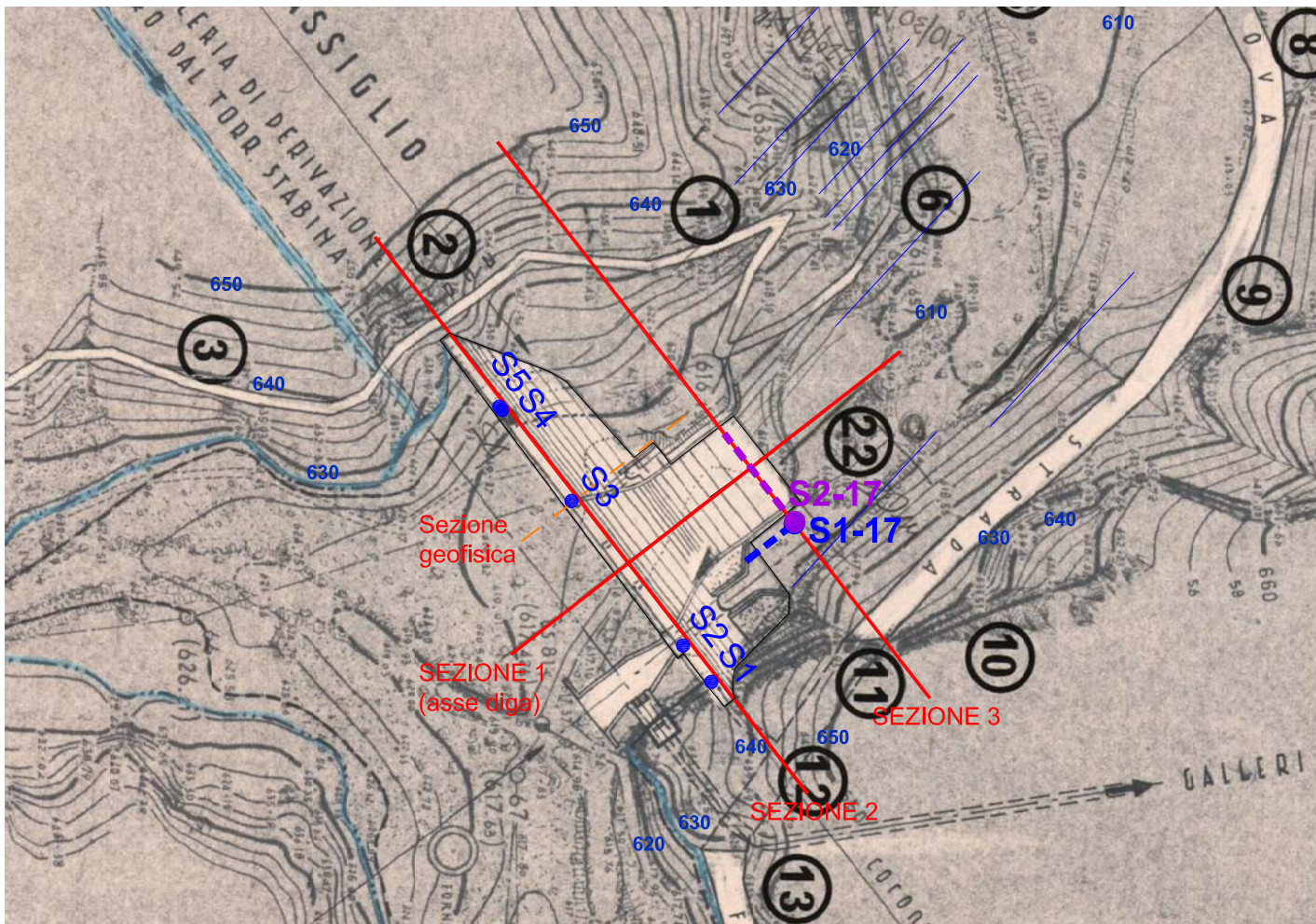
$$GSI = 9 * \ln Q' + 44$$

$$Q' = (RQD/Jn) * (Jr/Ja)$$

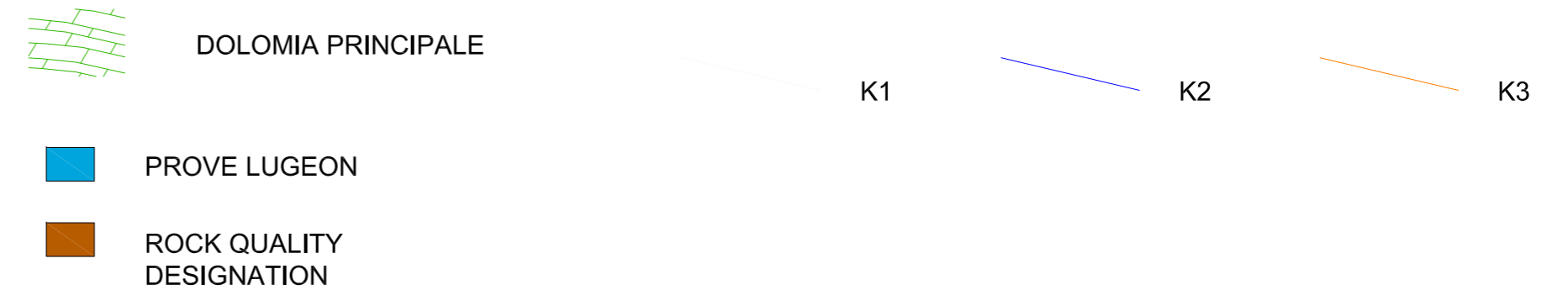
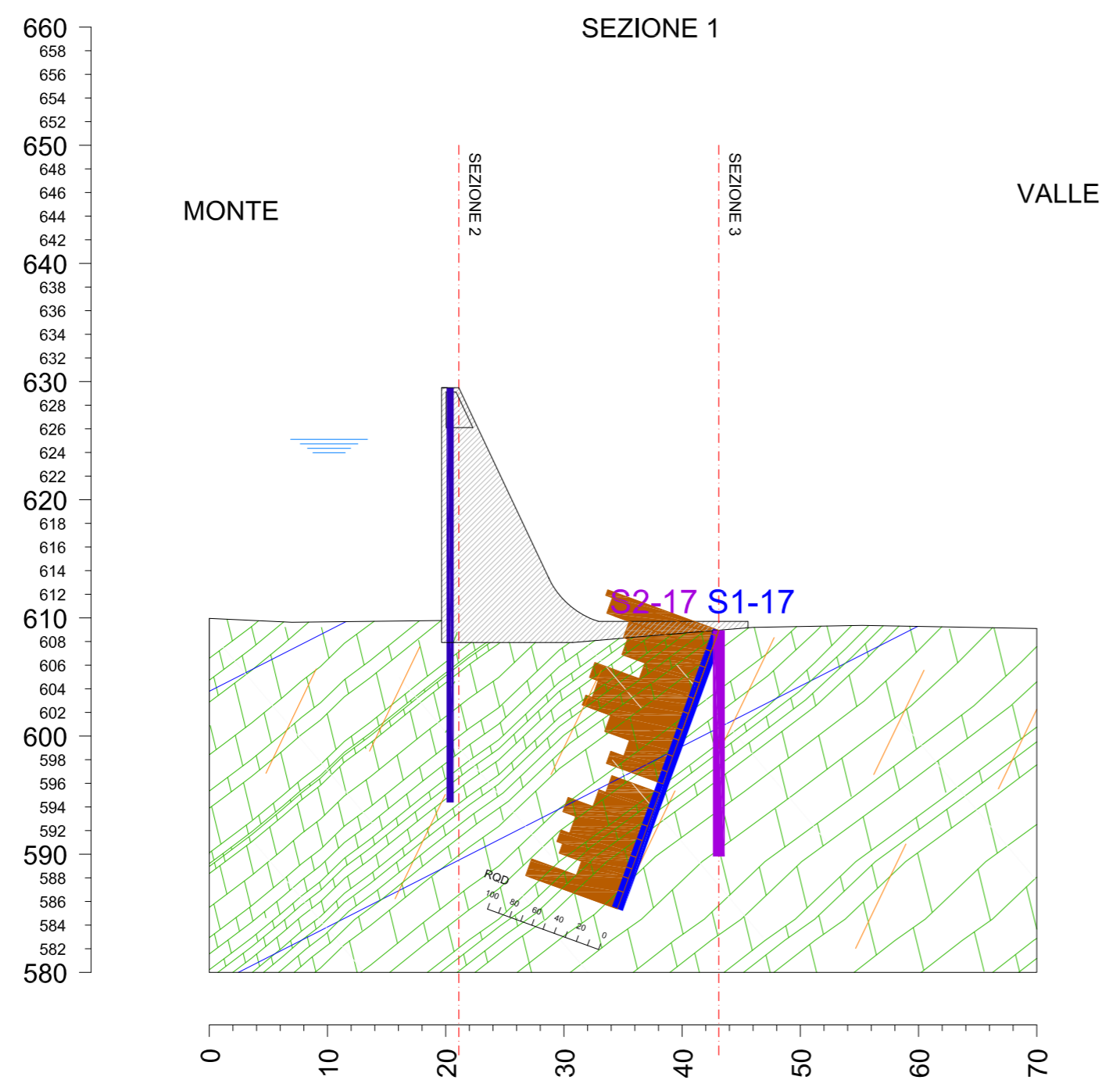
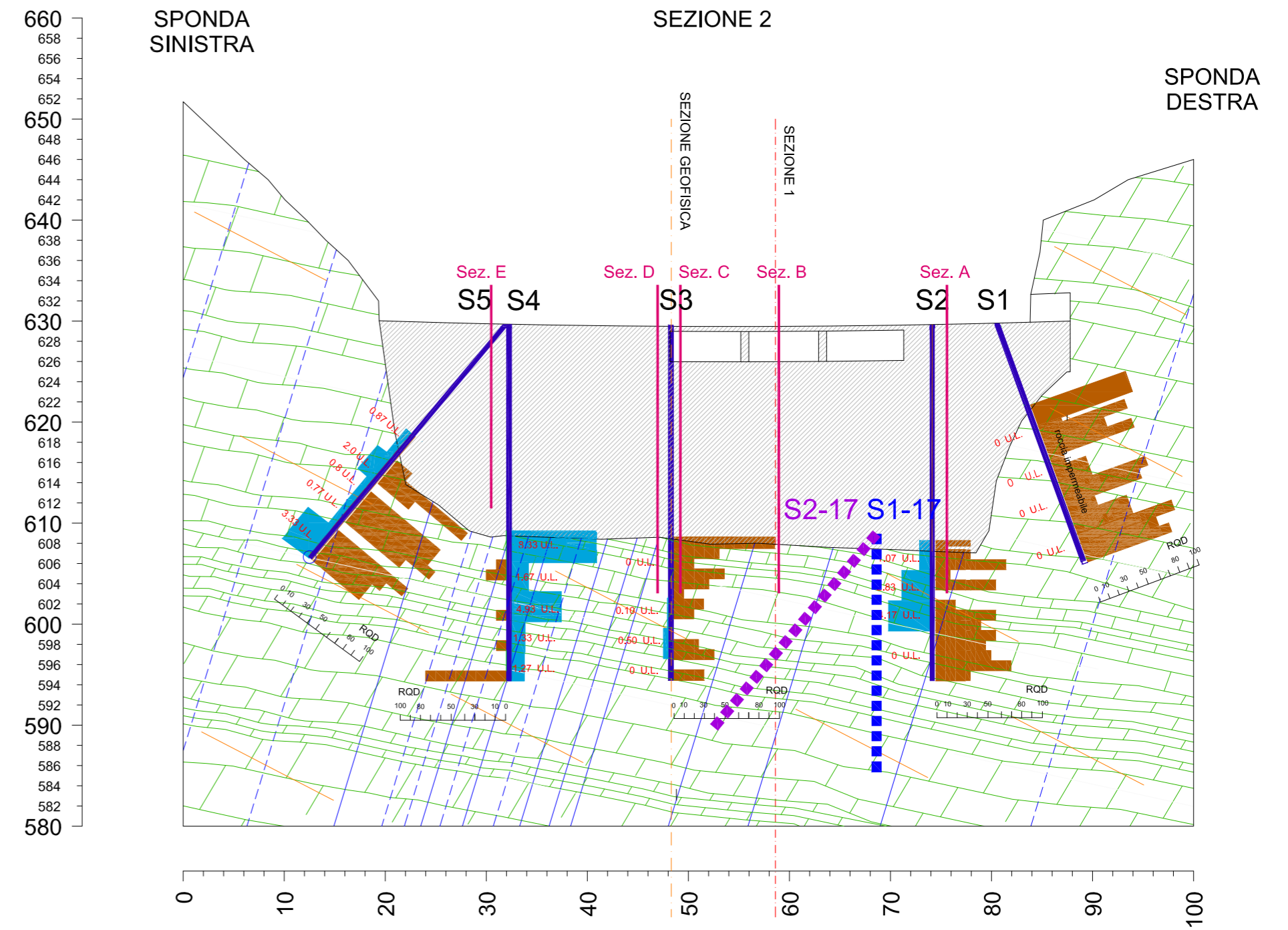
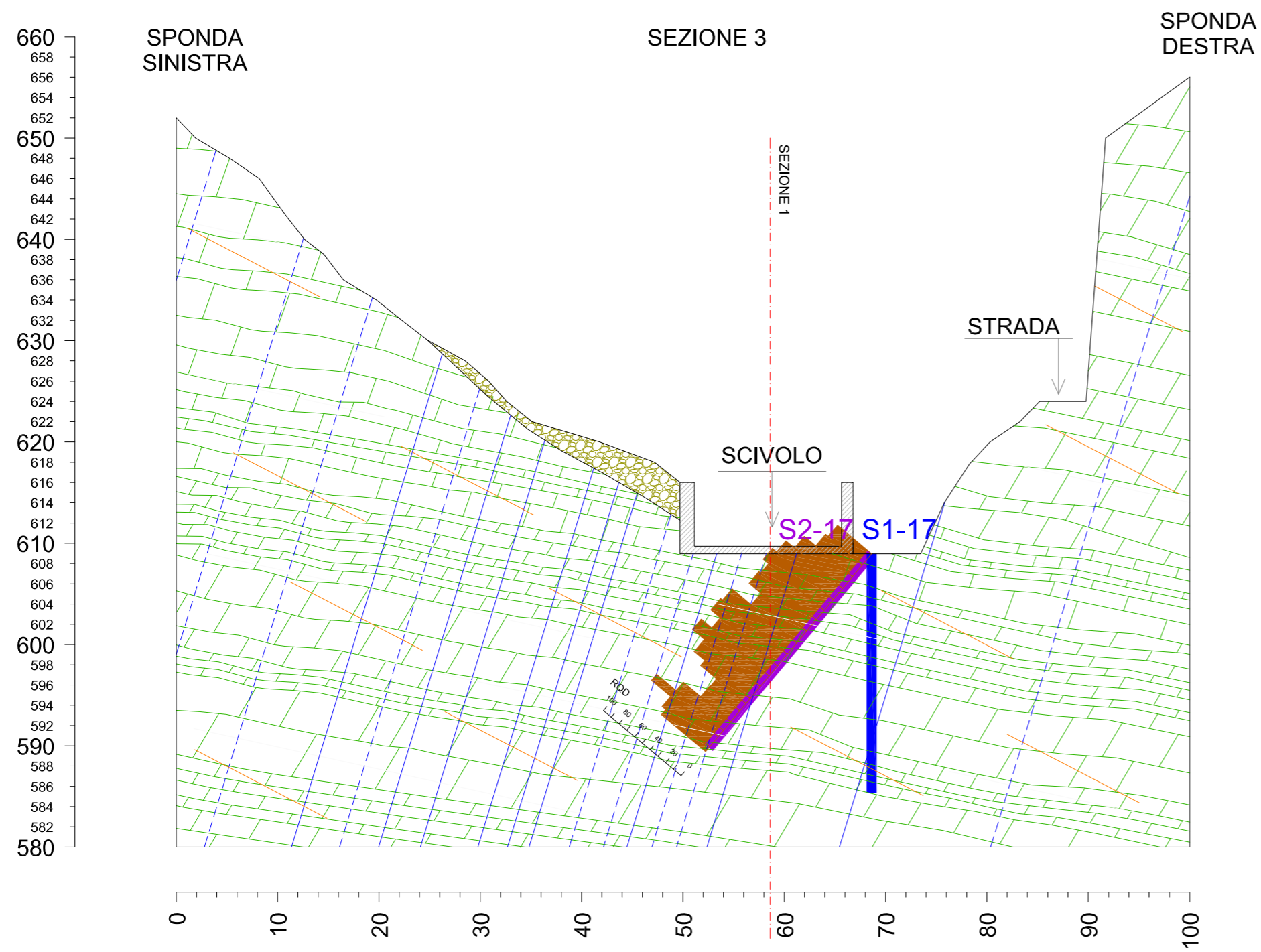
$$Q = Q' * (Jw/SRF)$$

$$Q' = \exp[(GSI-44)/9]$$

## 18 ALLEGATI - TAVOLE



COMMITTENTE		
ITALGEN SPA		
APPESANTIMENTO CORPO DIGA – DIGA DI CASSIGLIO (BG)		
PLANIMETRIA TECNICA		
TAVOLA	SCALA 1:1.000 FORMATO A4	SIAL.TEC ENGINEERING srl VIA S.GIUSEPPE 24 MONTELLO (BG)
sialtec.01	UNITA' MISURA m	redatto Ing. Stefano Guido mobile: +39 348 4501806 e-mail: stefano.guido@sialte.it



COMMITTENTE			
ITALGEN SPA			
APPESANTIMENTO CORPO DIGA - DIGA DI CASSIGLIO (BG)			
SEZIONI TECNICHE			
TAVOLA	SCALA 1:500 FORMATO A2	SIALTEC ENGINEERING srl VIA S. GIUSEPPE 24 MONTELLO (BG)	
sialtec.02	UNITA' MISURA m	redatto	Ing. Stefano Guido mobile: +39 348 4501806 e-mail: stefano.guido@sialtec.it



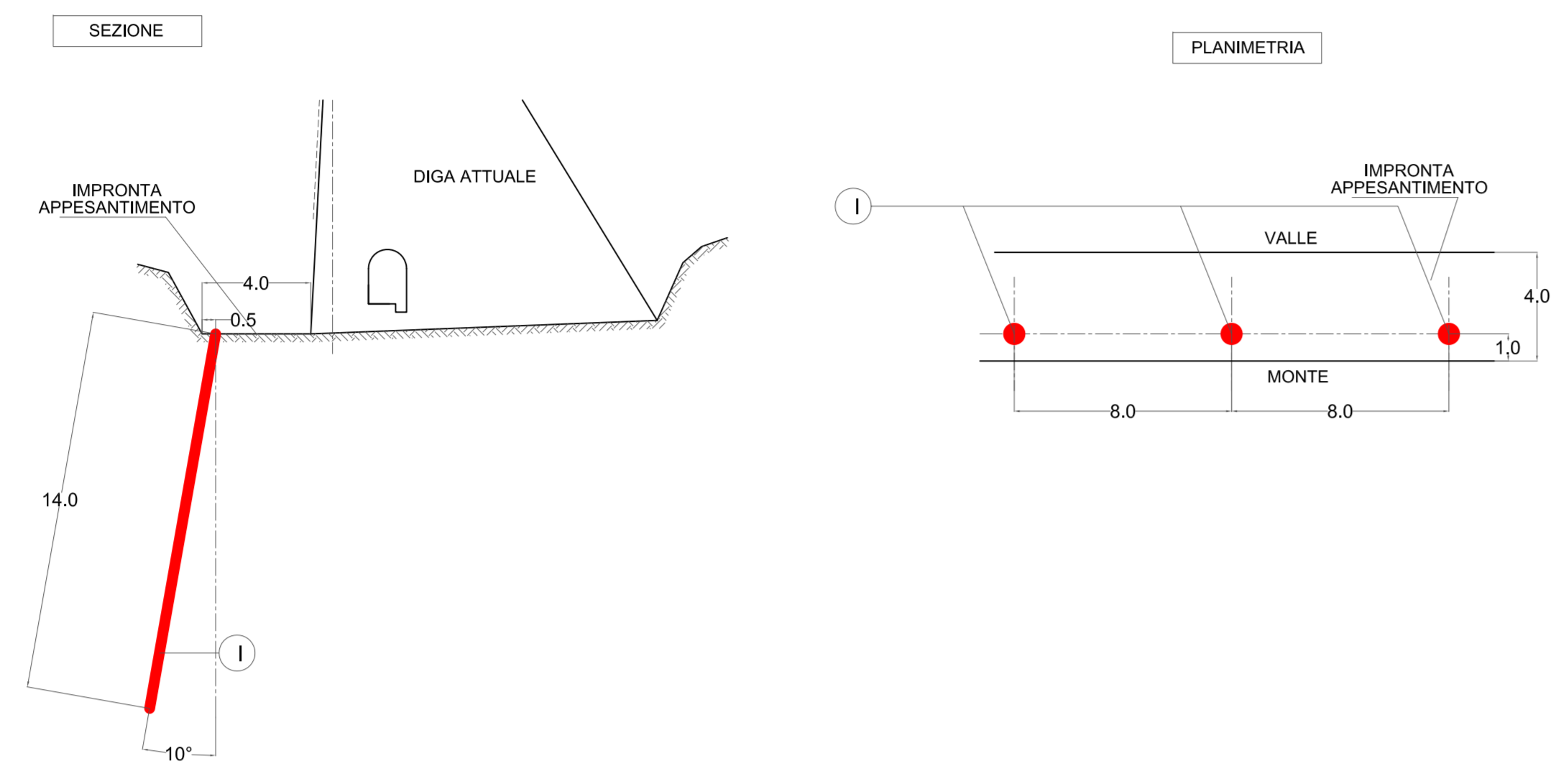
FASI ESECUTIVE

PROSPETTO - VISTA DA MONTE

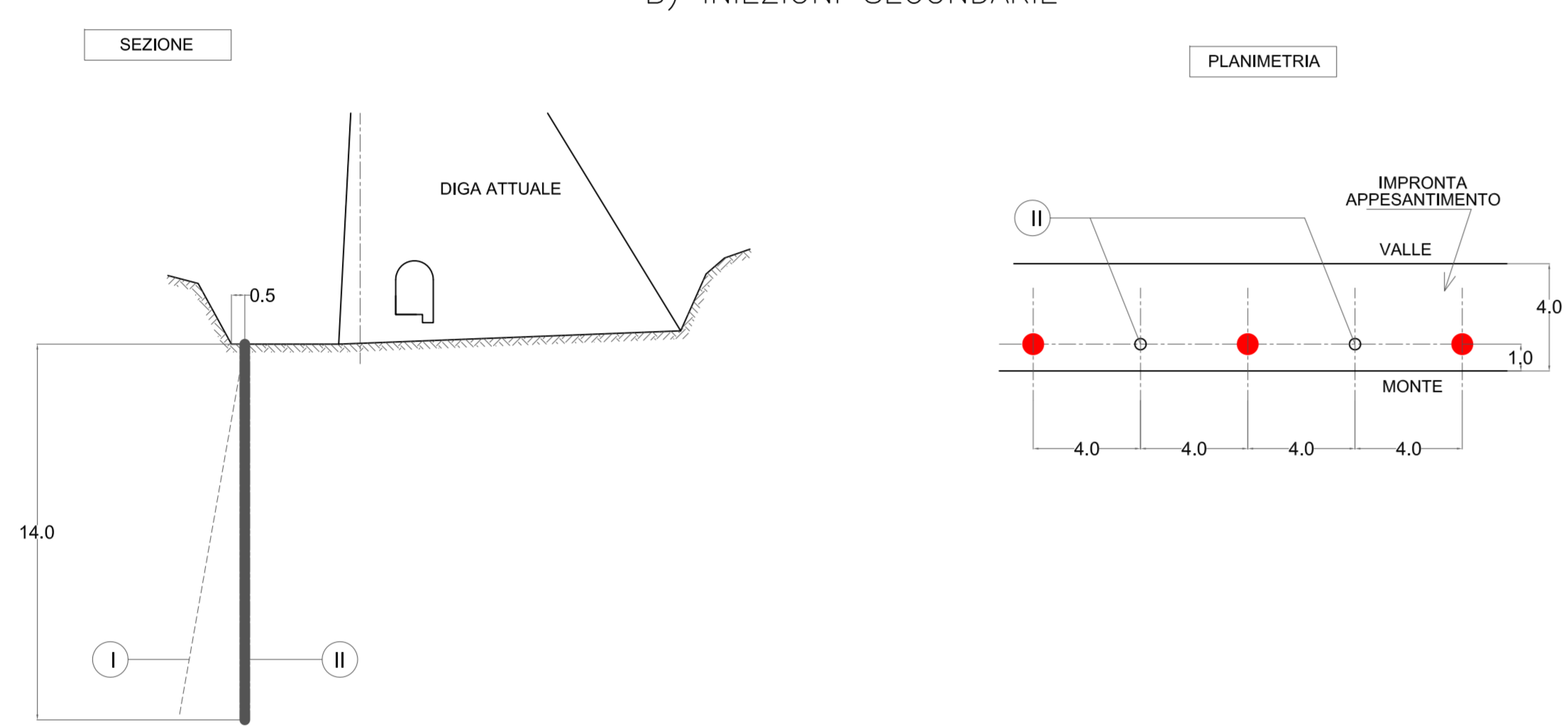
SCHERMO DI IMPERMEABILIZZAZIONE

CUCITURA

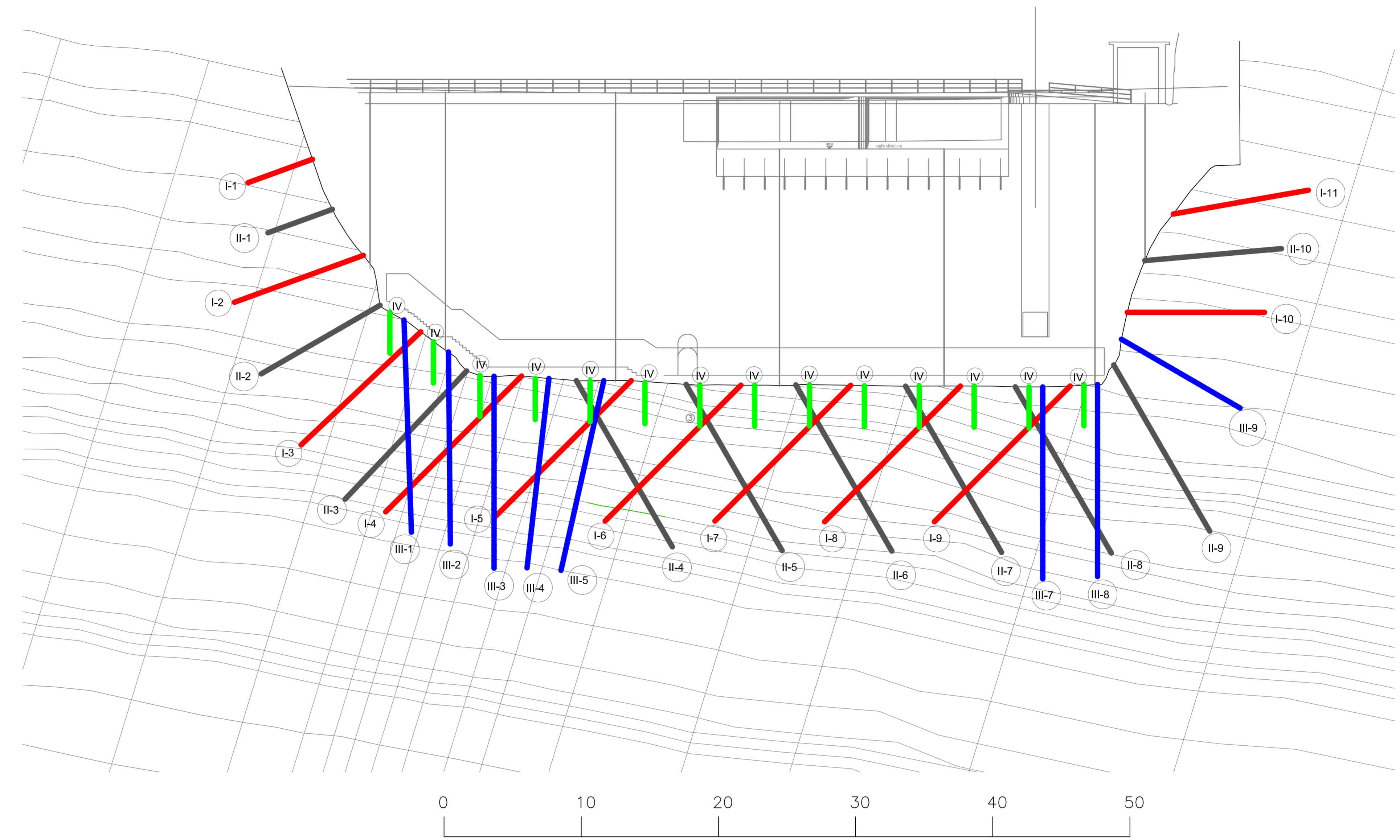
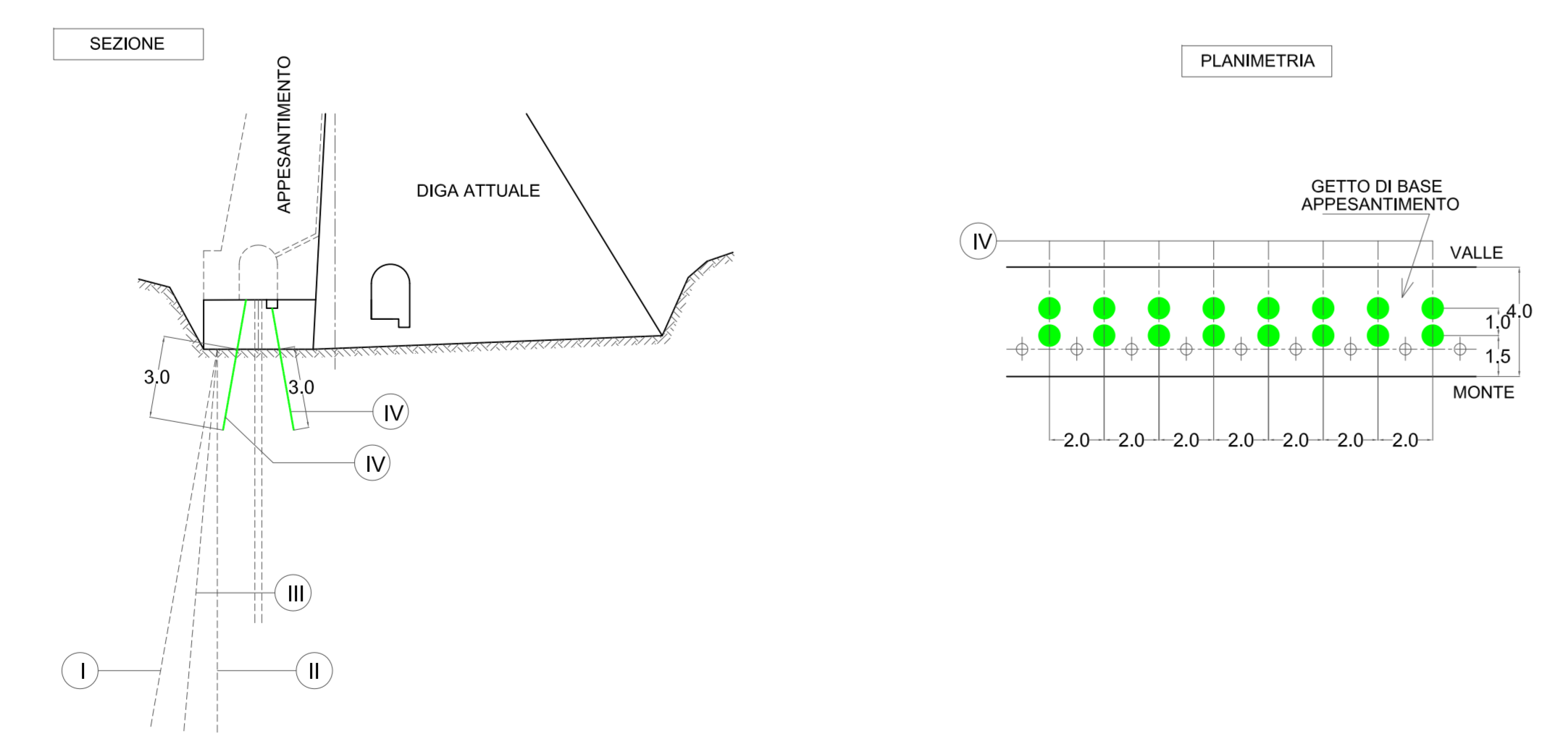
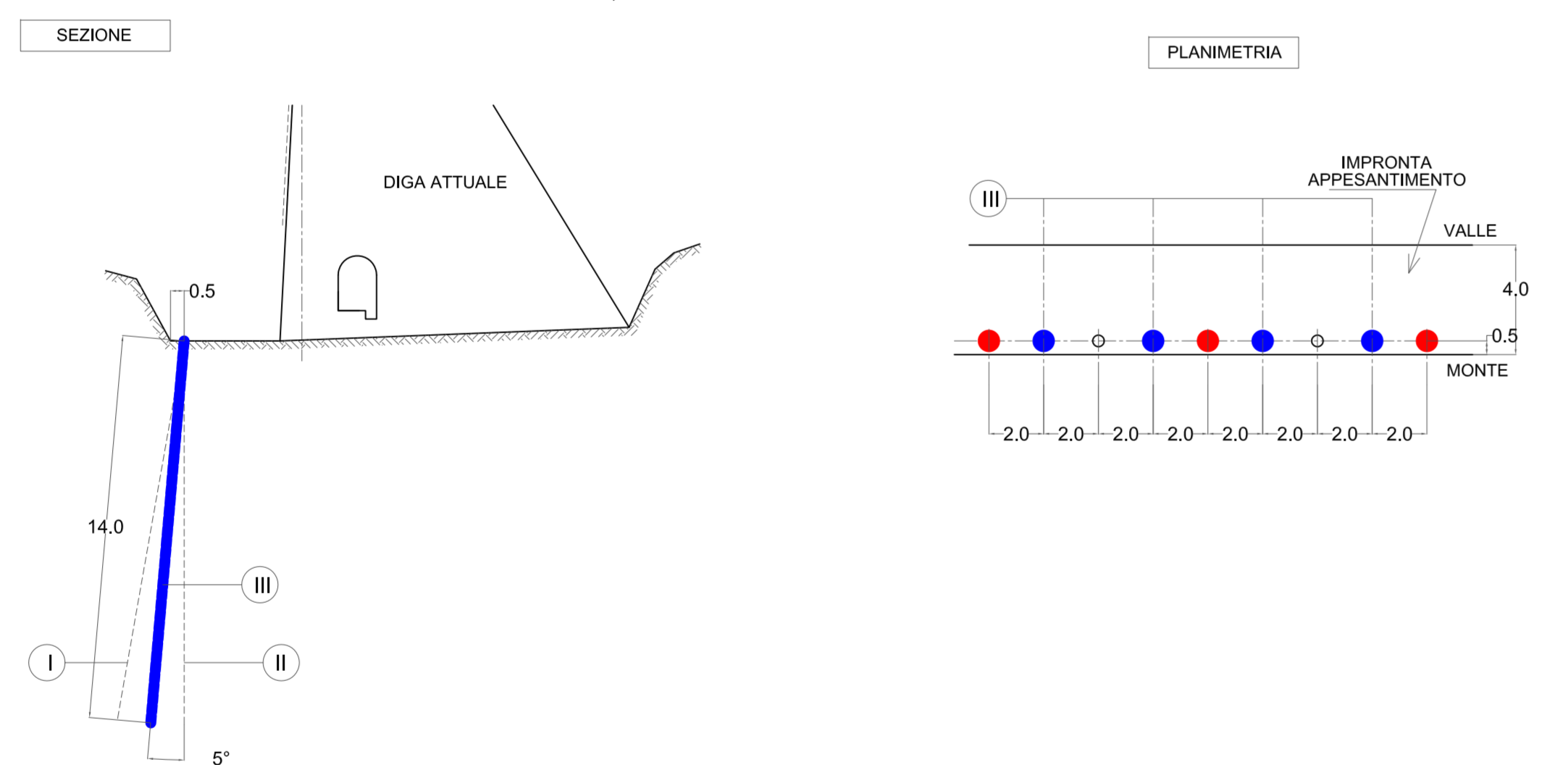
A) INIEZIONI PRIMARIE



B) INIEZIONI SECONDARIE



C) INIEZIONI TERZIARIE



SCALA GRAFICA [m]

SCHERMO IMPERMEABILE

PERFORAZIONE	L [m]
I-1	5
I-2	10
I-3	12
I-4	14
I-5	14
I-6	14
I-7	14
I-8	14
I-9	14
I-10	10
I-11	10
II-1	5
II-2	10
II-3	14
II-4	14
II-5	14
II-6	14
II-7	14
II-8	14
II-9	14
II-10	10
III-1	14
III-2	14
III-3	14
III-4	14
III-5	14
III-6	14
III-7	14
III-8	14
III-9	14
TOTALE	366

CUCITURA

PERFORAZIONE	L [m]
IV	3 X 28 = 84 m

SPECIFICHE

CUCITURA: CEMENTAZIONE A GRAVITA  
 SCHERMO  
 INIEZIONI RIPETURE E SELETTIVE CON CANNE VALVOLATE  
 PASSO VALVOLE 1.5 m  
 MISCELA CEMENTIZIA  
 RAPPORTO A/C 0.65-0.75  
 USARE ADDITIVO FLUIDIFICANTE  
 Rck a 28 gg > 15 N/mm2  
 pressione di iniezione:  $P = 2 + 0.25 Z$  (Z profondità [m], P [bar])  
 criterio rifiuto: GIN < 500 bar\*/m  
 k.rock < 3.5 Unità Lugeon

		COMPANY ITALGEN	
PLANT DIGA DI CASSIGLIO		DEPT. CENTRALI IDROELETTRICHE	
APPESANTIMENTO DIGA DI CASSIGLIO SCHERMO IMPERMEABILE - TRATTAMENTO DI INIEZIONE DELLA ROCCIA			
00	emissione	AM	SG
REV	DESCRIPTION	DRAWNUP	APP
20		21	22
DRAWN UP BY Martignoni		DATE gen 2018	
APPID BY Guido		DATE gen 2018	
PROJECT CODE 02000441		DWG. N. SIAL.TEC-003	
00		00	SCALE 1:200