

## Omaggio a due dighe centenarie : Vulci e Pagnona

*Diga di Pagnona*

*Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga*

*Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

*Andrea Torre – Resp. DCIS/Geological Support*

*Enel Green Power Italia*

# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

Condizioni di partenza della muratura diga e della roccia di fondazione

2000 → Prima campagna di indagini geognostiche



«la muratura appare costituita da grossi blocchi di pietrame [...] intervallati da strati di malta dello spessore variabile da qualche centimetro a qualche decimetro.

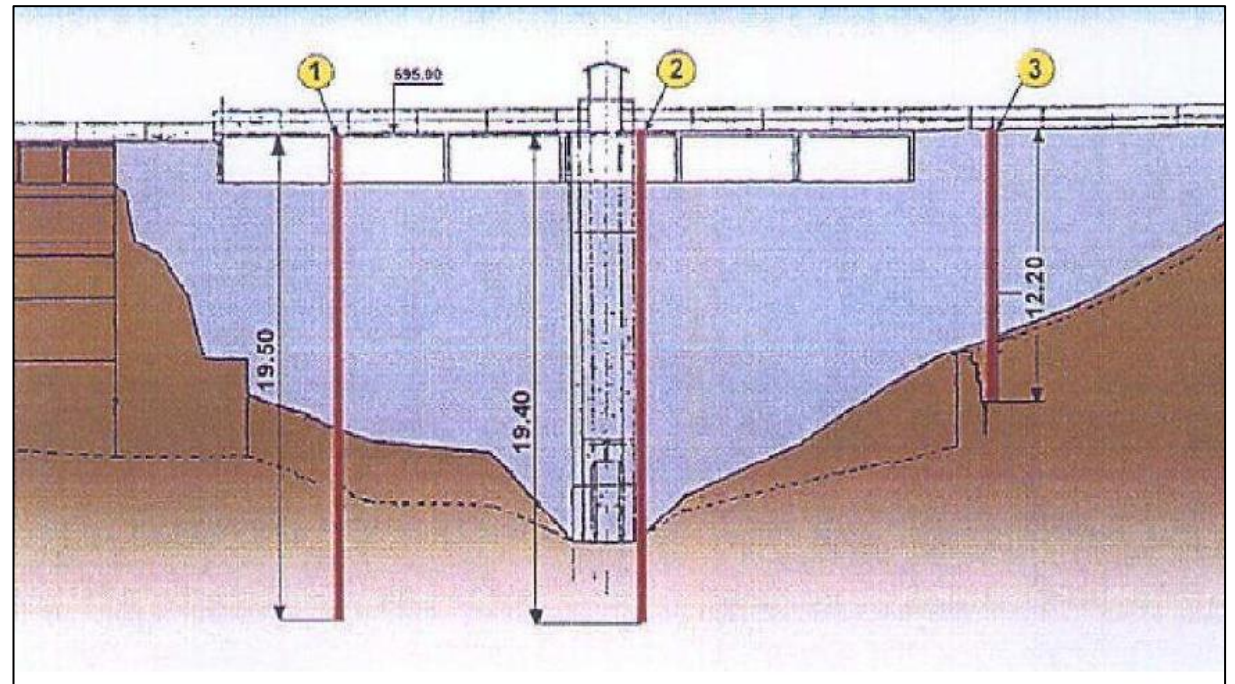
**La malta si presenta con caratteristiche di consistenza molto variabili, passando da una apparente compattezza ad una condizione di maggior porosità o disgregazione»..**

Il pietrame della muratura:

- massa volumica media di  $2630 \text{ kg/m}^3$
- velocità ultrasonica media di  $4400 \text{ m/s}$
- resistenza a compressione variabile da 60 a 150 Mpa

La malta della muratura:

- massa volumica media di  $2150 \text{ kg/m}^3$
- velocità ultrasonica media di  $3800 \text{ m/s}$
- resistenza a compressione variabile da 9 a 40 MPa Permeabilità all'acqua della malta dell'ordine di  $10^{-10} \text{ m/s}$



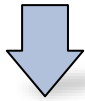


# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

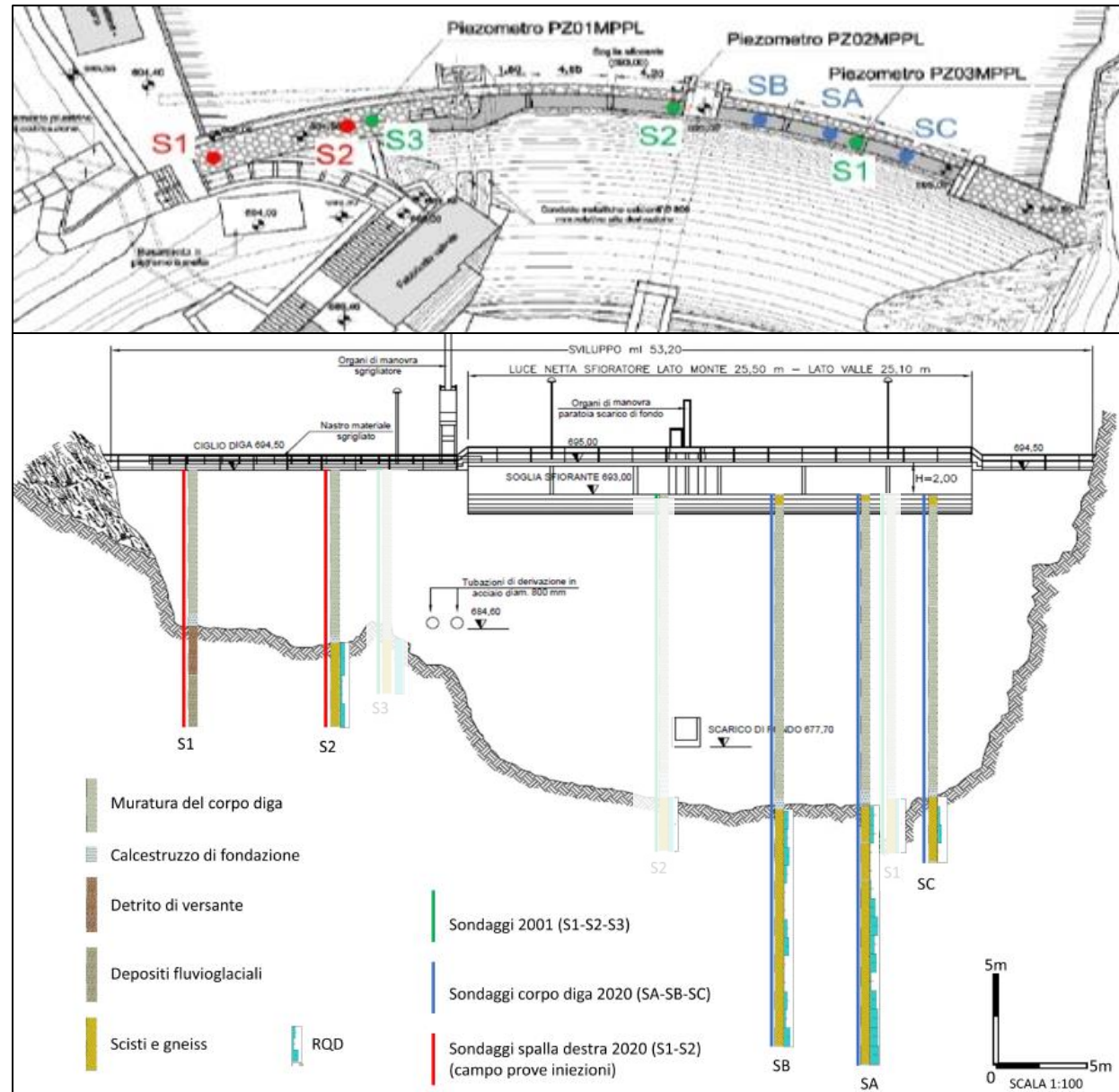
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

Condizioni di partenza della muratura diga e della roccia di fondazione

2020 → Nuova campagna di indagini geognostiche



- Perforazione di n. 5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo
- Esecuzione di prove di permeabilità in foro
- Esecuzione di videoispezioni nei fori di sondaggio con tecnica Bhtv e sonica
- Prelievo di n. 30 campioni dalle carote ricavate dai sondaggi ed effettuazione di prove di laboratorio
- Acquisizione geofisica di due cross-hole tra due coppie di sondaggi nel corpo diga e nella spalla destra
- Acquisizione di una tomografia sismica che ha interessato il corpo diga nella sua lunghezza ed i terreni circostanti



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## *Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

Condizioni di partenza della muratura diga e della roccia di fondazione

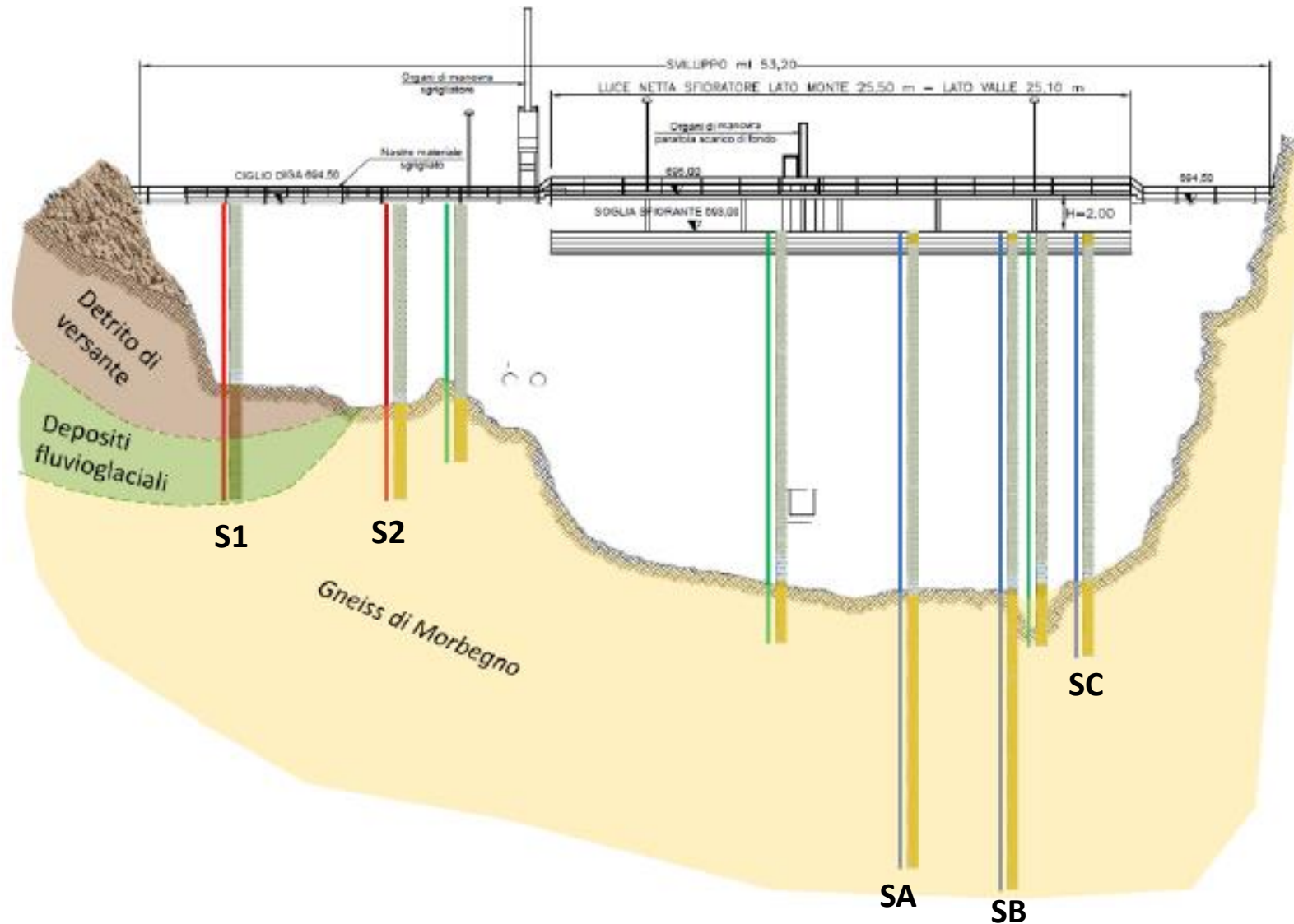
2020 → Nuova campagna di indagini geognostiche



Ricostruzione dettagliata della sezione geologica di imposta

La diga risulta fondata quasi interamente su roccia metamorfica compatta appartenente alla formazione degli Gneiss di Morbegno intercalata agli Scisti dei Laghi

La spalla destra appoggia su uno sperone morenico sul quale poggiano terreni sciolti di detrito di versante

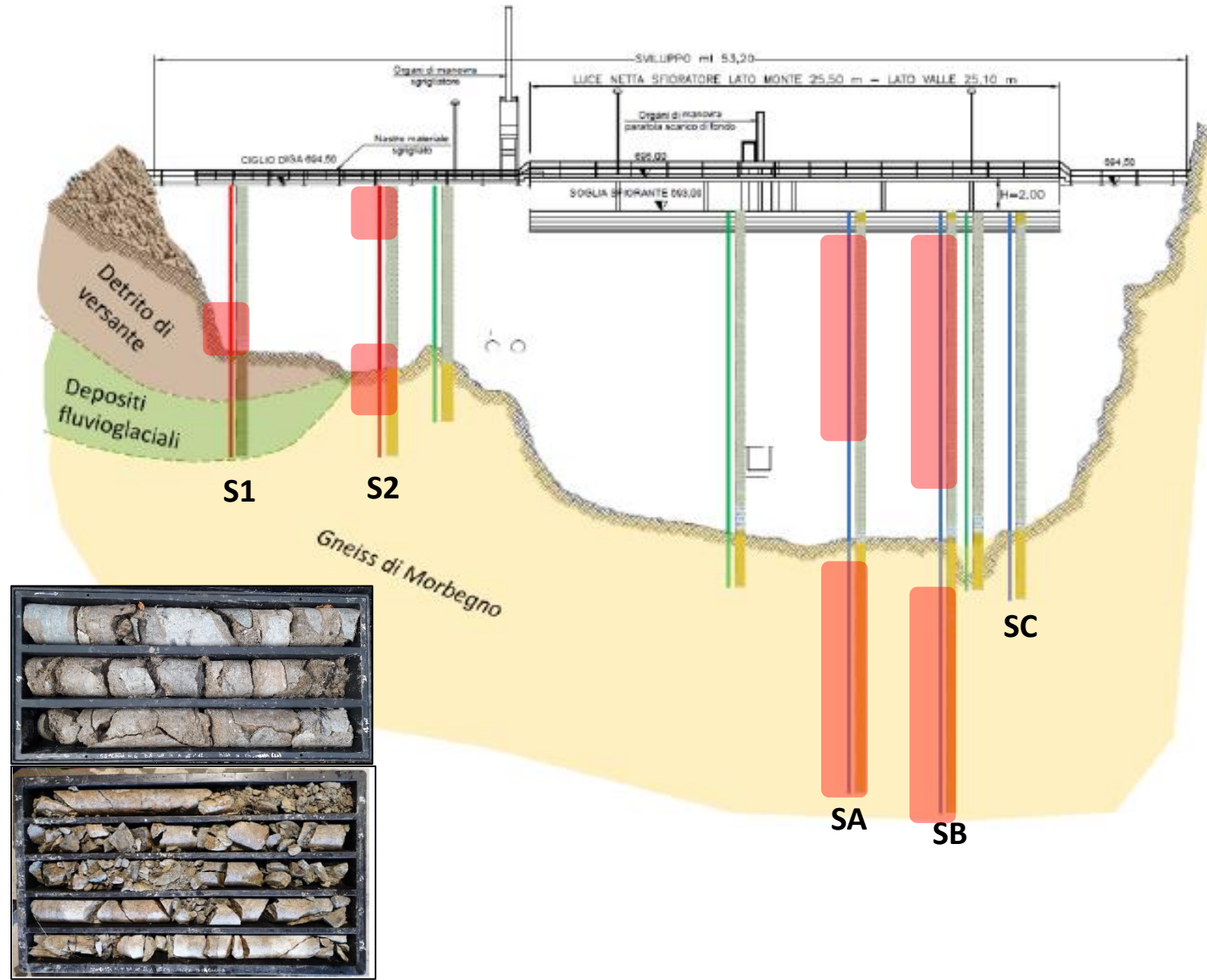


# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Permeabilità K

Foro n.	Prova n.	Materiale interessato dalla prova	Tipo di prova	Tratto di prova		Permeabilità K (m/s)
				Da m	a m	
S1	K1	Calcestruzzo	Lugeon	1.5	3.5	$3.3 \cdot 10^{-6}$
S1	K2	Calcestruzzo	Lugeon	3.5	6.0	$1.2 \cdot 10^{-6}$
S1	K3	Calcestruzzo	Lugeon	6.0	8.5	$5.5 \cdot 10^{-5}$
S2	K1	Calcestruzzo	Lugeon	1.0	3.5	$2.3 \cdot 10^{-4} *$
S2	K2	Calcestruzzo	Lugeon	3.5	6.0	$7.5 \cdot 10^{-6}$
S2	K3	Calcestruzzo	Lugeon	6.0	8.5	$1.2 \cdot 10^{-5}$
S2	K4	Calcestruzzo-Roccia	Lugeon	8.5	11.0	$2.1 \cdot 10^{-5}$
S2	K5	Roccia	Lugeon	11.0	14.0	$9.9 \cdot 10^{-7}$
SA	K1	Calcestruzzo	Lugeon	1.5	4.0	$1.9 \cdot 10^{-4} *$
SA	K2	Calcestruzzo	Lugeon	4.5	7.0	$2.7 \cdot 10^{-4} *$
SA	K3	Calcestruzzo	Lugeon	7.5	10.0	$2.1 \cdot 10^{-4} *$
SA	K4	Calcestruzzo	Lugeon	10.5	13.0	$1.4 \cdot 10^{-6}$
SA	K5	Calcestruzzo	Lugeon	13.5	16.0	$1.9 \cdot 10^{-6}$
SA	K6	Roccia	Lugeon	20.0	22.5	$2.0 \cdot 10^{-4} *$
SA	K7	Roccia	Lugeon	24.0	26.50	$2.7 \cdot 10^{-4} *$
SA	K8	Roccia	Lugeon	28.50	31.0	$2.4 \cdot 10^{-4} *$
SB	K1	Calcestruzzo	Lugeon	1.5	4.0	$3.1 \cdot 10^{-4} *$
SB	K2	Calcestruzzo	Lugeon	4.5	7.0	$2.7 \cdot 10^{-4} *$
SB	K3	Calcestruzzo	Lugeon	7.5	10.0	$2.9 \cdot 10^{-4} *$
SB	K4	Calcestruzzo	Lugeon	10.5	13.0	$3.1 \cdot 10^{-4} *$
SB	K5	Calcestruzzo	Lugeon	13.5	16.0	$1.9 \cdot 10^{-4} *$
SB	K6	Calcestruzzo	Lugeon	15.5	18.0	$1.0 \cdot 10^{-6}$
SB	K7	Roccia	Lugeon	20.5	23.0	$3.1 \cdot 10^{-4} *$
SB	K8	Roccia	Lugeon	24.0	26.50	$2.9 \cdot 10^{-4} *$
SB	K9	Roccia	Lugeon	28.50	31.0	$3.3 \cdot 10^{-4} *$

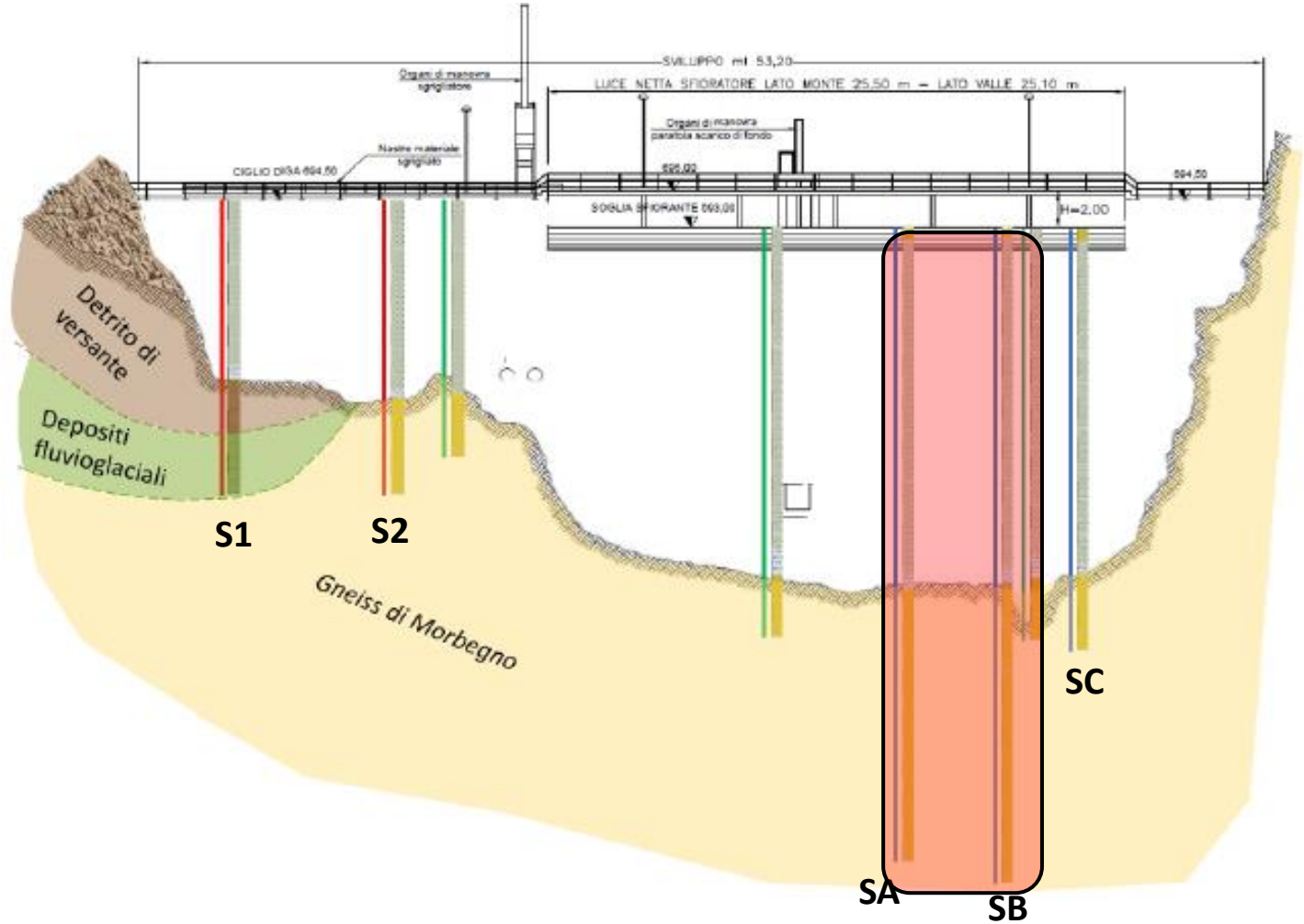
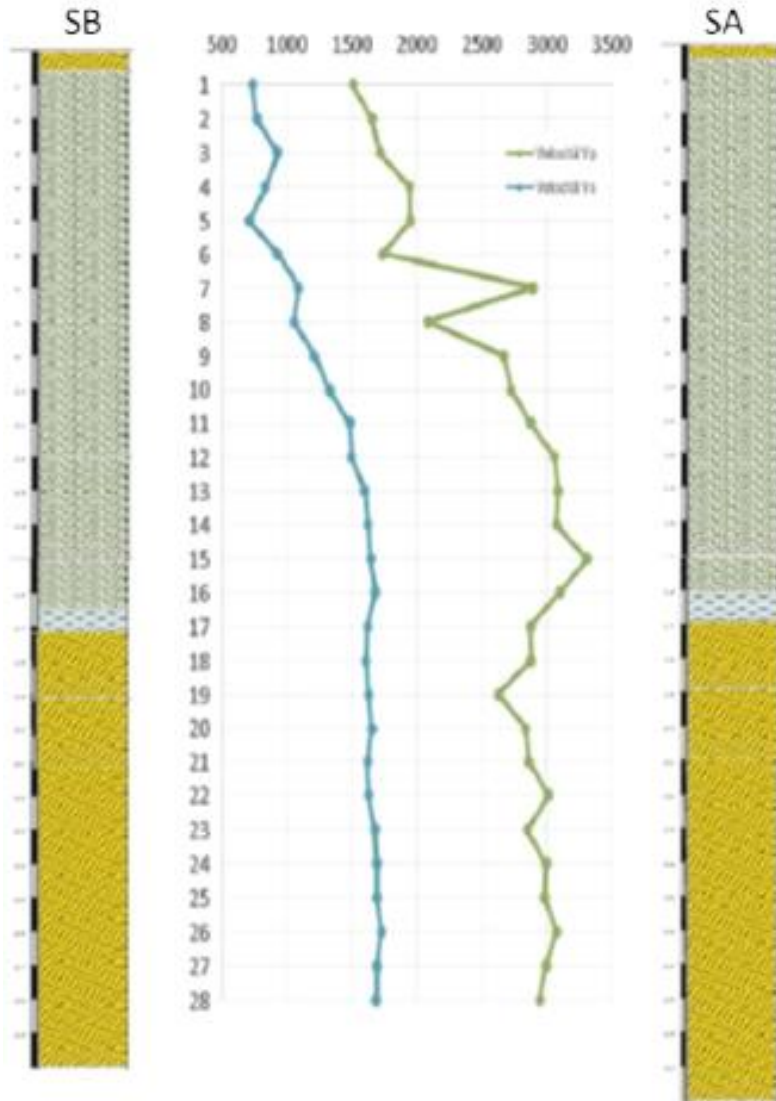




# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Prove Cross-Hole

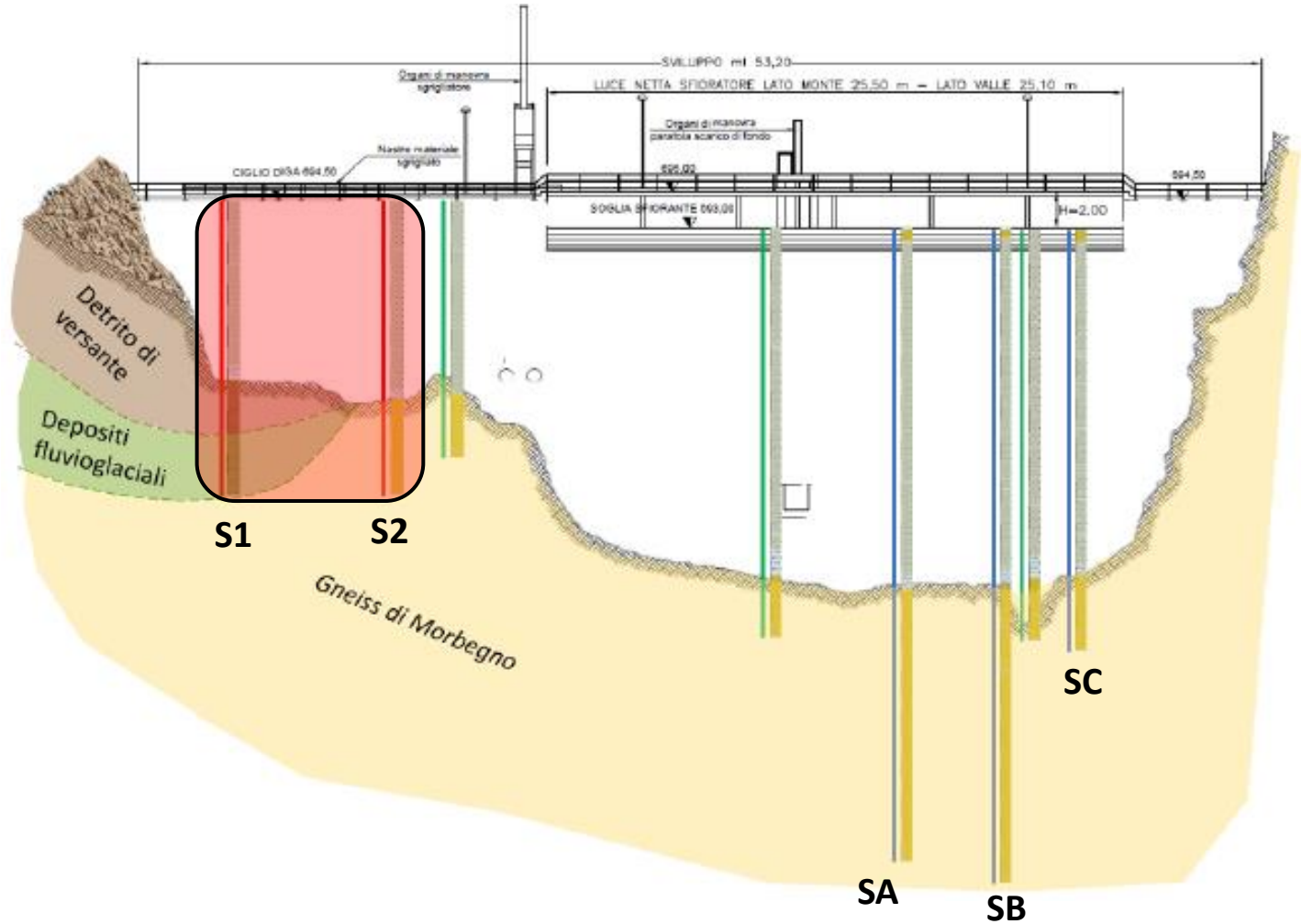
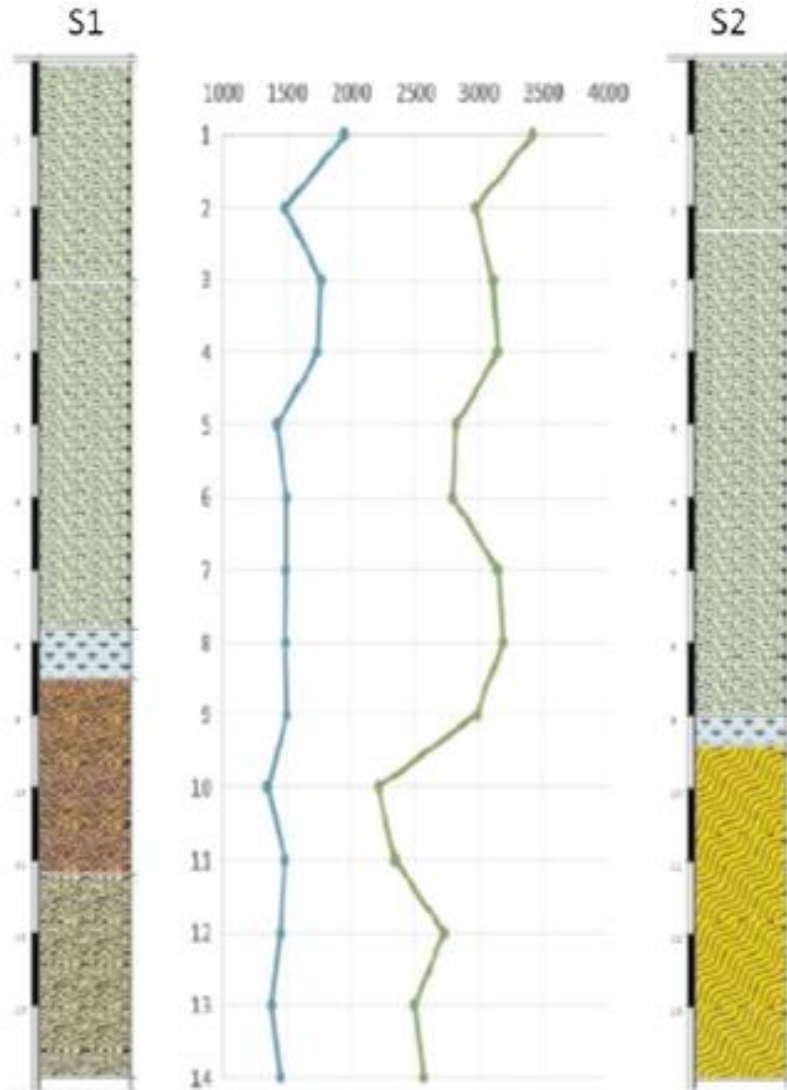


La velocità delle onde  $V_p$  e  $V_s$  parte da valori superficiali piuttosto bassi,  $V_p=1500$  m/s e  $V_s=740$  m/s, per poi posizionarsi su un trend in costante salita fino alla base della diga, dove si superano rispettivamente i 3300 e 1600 m/s  
Graduale miglioramento delle condizioni della muratura con la profondità  
Flessione della velocità al disotto della diga, dovuta probabilmente all'elevato grado di fratturazione riscontrato nella roccia in entrambi i sondaggi

# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Prove Cross-Hole

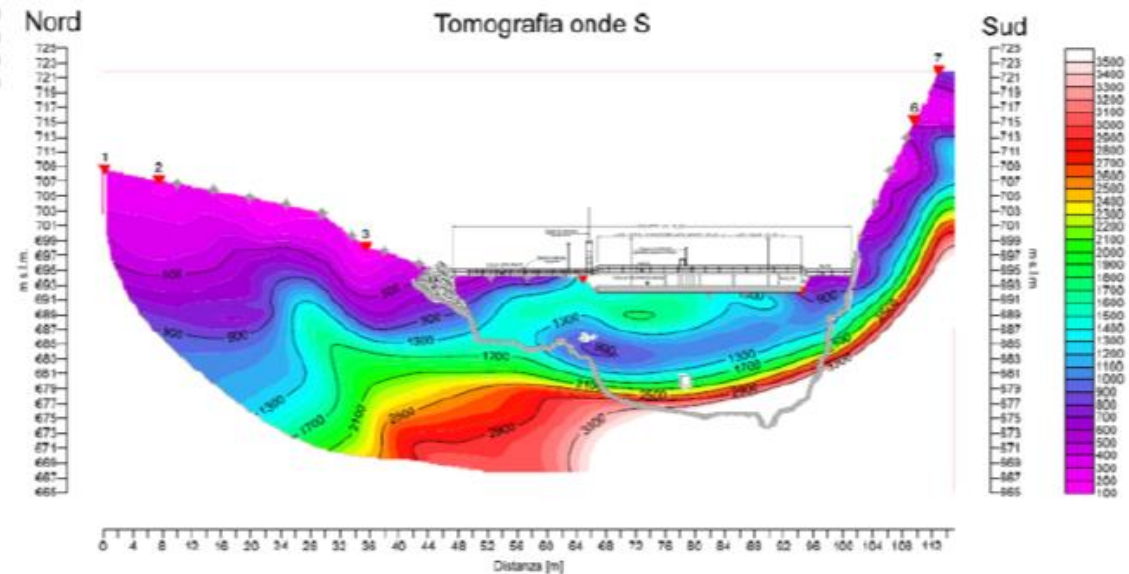
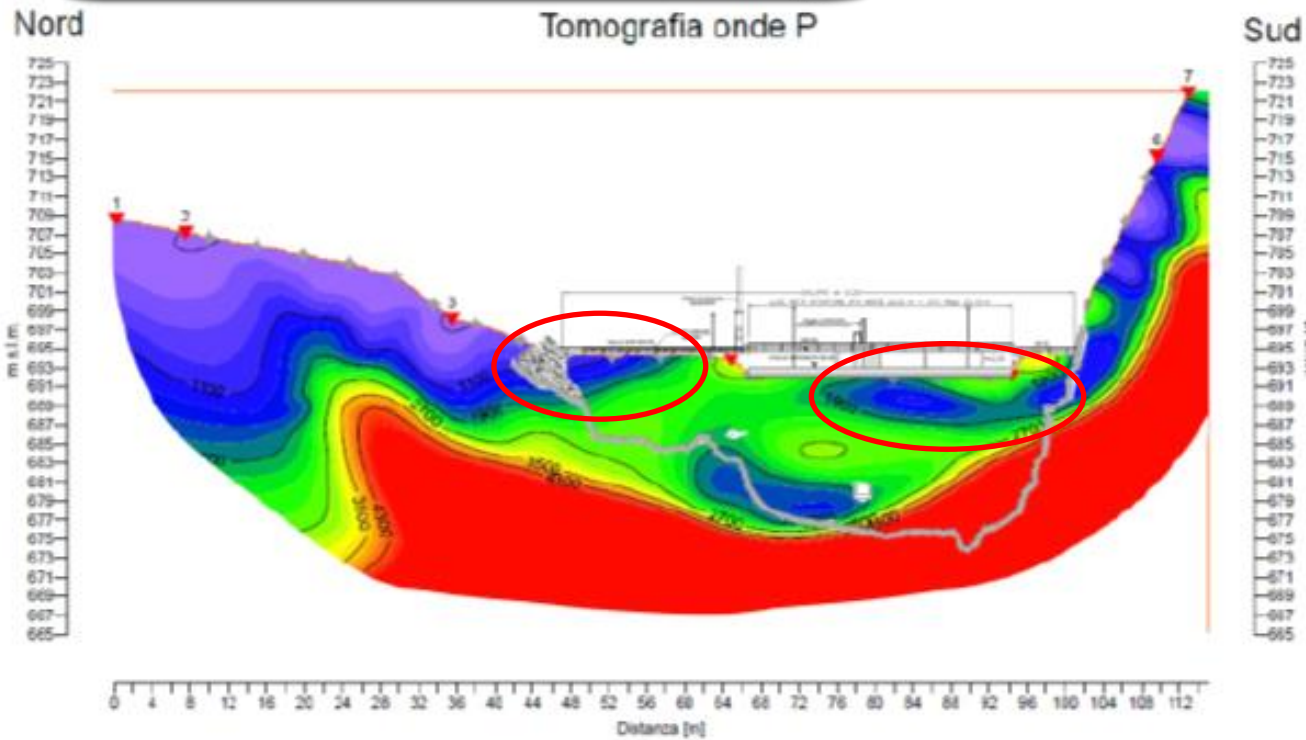


Nel corpo diga le onde Vp rimangono nell'intorno dei 3000 m/s e le onde Vs 1500 m/s. Però, mentre quest'ultime rimangono pressoché invariate fino a fondo foro, la velocità delle Vp subisce un brusco calo, da 3000 a 2200 m/s, appena passati al di sotto del calcestruzzo di fondazione. Questo abbassamento della velocità è da attribuirsi alla presenza delle ghiaie che si ritrovano nella metà inferiore del sondaggio S1.

# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Tomografia sismica a rifrazione





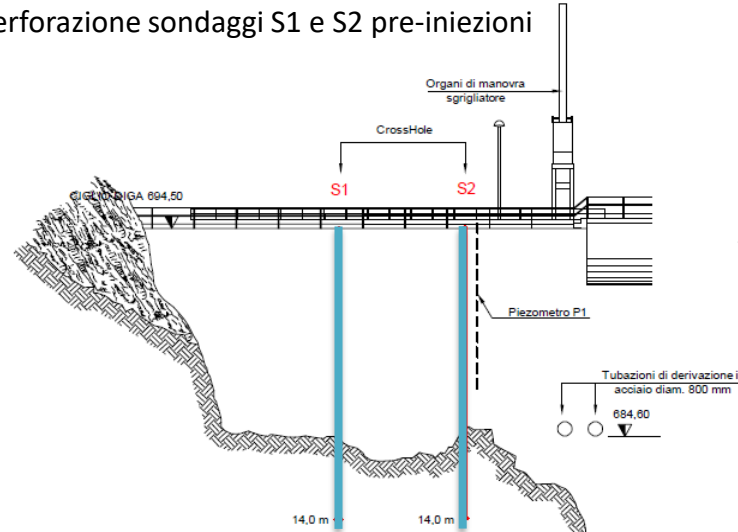
# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

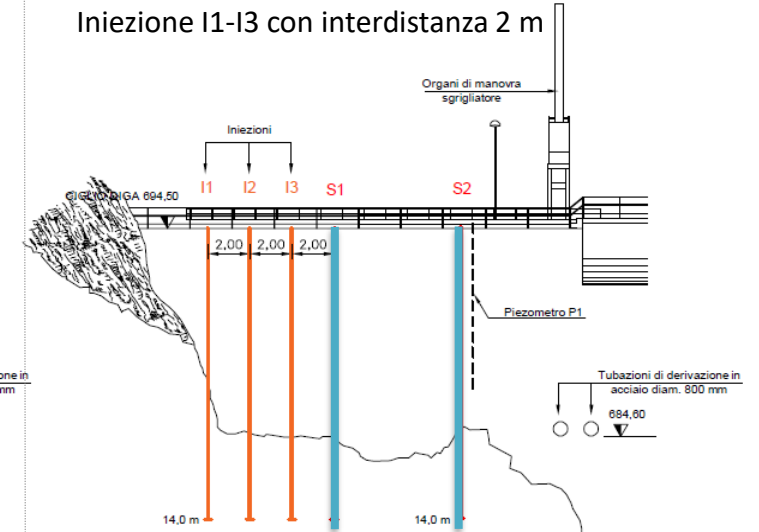
### Campo Prove iniezioni (01/02-2021)

- Perforazione sondaggi S1 e S2 pre-iniezioni con prove Lugeon e acquisizione cross-hole per studiare le caratteristiche di muratura e roccia di fondazione e determinare i parametri ottimali per l'iniezione
- Perforazione della prima serie di fori di iniezione I1-I3 con interdistanza 2 m ed immissione della boiaccia con metodo GIN (Grouting Intensity Number)
- Perforazione della seconda serie di fori di iniezione I4-I6 con interdistanza 1,5 m ed immissione della boiaccia con metodo GIN
- Perforazione dei sondaggi di controllo S3 e S4 per confrontare l'efficacia delle iniezioni tra i due set

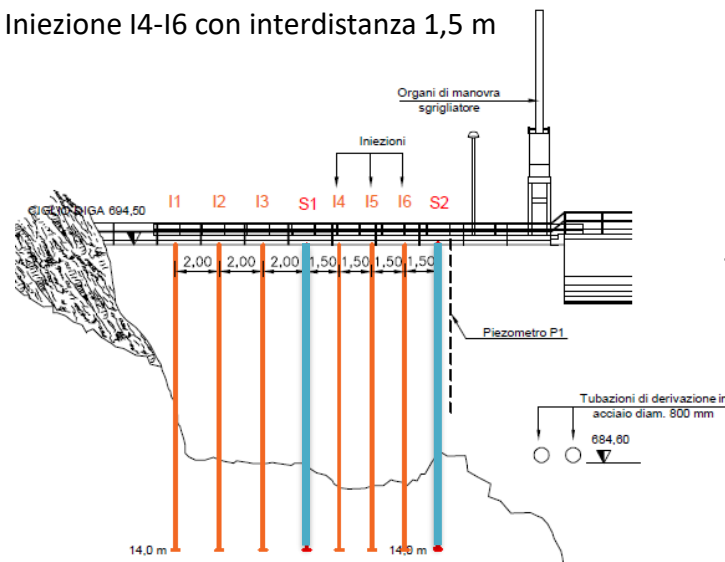
Fase 1  
Perforazione sondaggi S1 e S2 pre-iniezioni



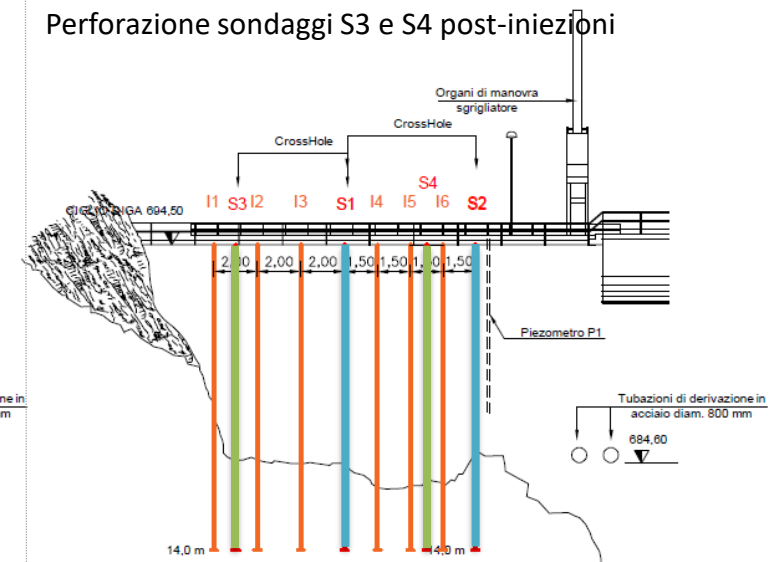
Fase 2  
Iniezione I1-I3 con interdistanza 2 m



Fase 3  
Iniezione I4-I6 con interdistanza 1,5 m



Fase 4  
Perforazione sondaggi S3 e S4 post-iniezioni





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

Campo Prove iniezioni (01/02-2021)





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

Risultati del Campo Prove iniezioni e scelta dei parametri di iniezione

Scelta della metodologia di iniezione



**Inefficacia del sistema classico di iniezione con guaina plastica dovuta a eccessivo confinamento rigido** esercitato dalla muratura e dalla roccia con conseguente innalzamento anomalo delle P con rottura della guaina lungo l'interfaccia canna manchette-guaina e risalita del cemento a boccaforo

### Utilizzo sistema M.P.S.P. (Multi Packer Sleeved Pipe)

Posizionamento sul tubo a manchette di idonei sacchi otturatori che delimitano fasce di iniezione dalle dimensioni predeterminate (1.5 - 3 m)

I sacchi otturatori vengono gonfiati iniettando una miscela cementizia attraverso le valvole in modo che aderiscano adeguatamente alle pareti del foro

Le sacche permettono così di isolare e perimetrare i tratti da iniettare  
Passando a questo sistema di iniezione le pressioni sono risultate molto regolari



Scala (mt)	Canna a manchette	Porzione iniettata
1		Tappo superficiale in cemento
2	1	Sistema M.P.S.P.
3	2	Muratura diga
4	3	
5	4	
6	5	
7	6	Sistema M.P.S.P.
8	7	Interfaccia diga-roccia
9	8	
10	9	Sistema M.P.S.P.
11	10	
12	11	Roccia di fondazione
13	12	
14		



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Risultati del Campo Prove iniezioni e scelta dei parametri di iniezione

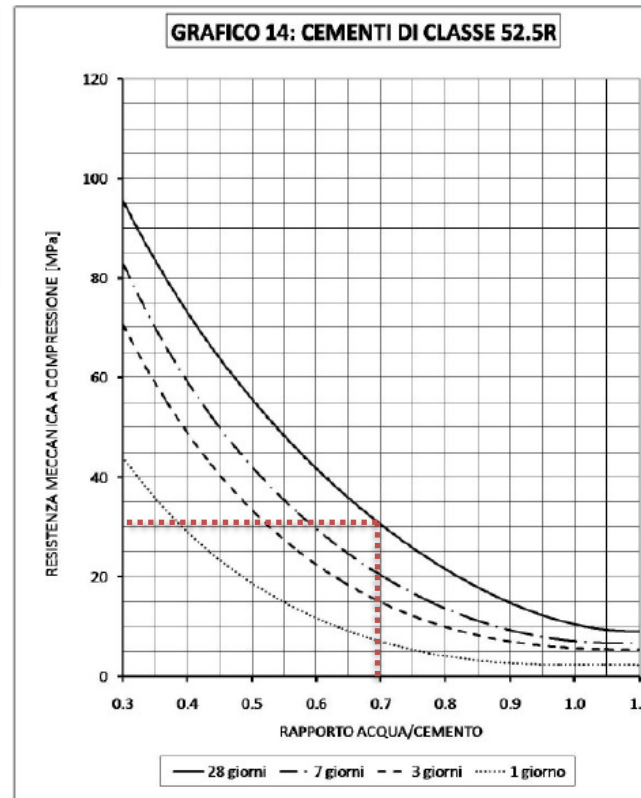
#### Definizione della miscela di iniezione



Cemento Portland di tipo I 52.5 R  
Blaine pari a 4889 cm<sup>2</sup> /g (cemento fine)  
Rapporto a/c = 0.7 + 2% di additivo fluidificante

Attesi valori di resistenza a compressione della malta di iniezione a 28 gg pari a circa 30 MPa

Uso di additivo fluidificante alla miscela ha consentito di mantenere basse pressioni di iniezione permettendo buona penetrabilità dell'iniezione all'interno del corpo murario



#### Definizione dei parametri di iniezione



Parametri iniziali  
usati nel campo  
prova

$P_{\max}$ : 25 bar  
 $V_{\max}$ : 350 l/m  
 $GIN_{\max}$ : 700-1000 bar l/m

#### Metodo GIN (Ground Intensity Number) – Lombardi, 1999

Intensità di iniezione → prodotto della P al momento dell'arresto dell'operazione x il volume iniettato in un tratto di foro unitario (1 m)

$$I_{\text{finale}} = P_{\text{finale}} \times (V_{\text{finale}}/L) \quad I = P \times V = GIN$$

Introducendo il concetto di GIN si riesce a definire e controllare l'intensità di iniezione

Tradizionalmente i criteri di arresto dell'iniezione sono controllati da 2 parametri ( $P_{\max}$  e  $V_{\max}$ ) → il concetto GIN permette di avere a disposizione 3 parametri ( $GIN_{\max}$ ,  $P_{\max}$  e  $V_{\max}$ )

Limitando e controllando l'energia di iniezione (non la Pressione) si riduce notevolmente il rischio di idrofratturazione



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Risultati del Campo Prove iniezioni e scelta dei parametri di iniezione

#### Sintesi dei risultati ottenuti dalle iniezioni del campo prove



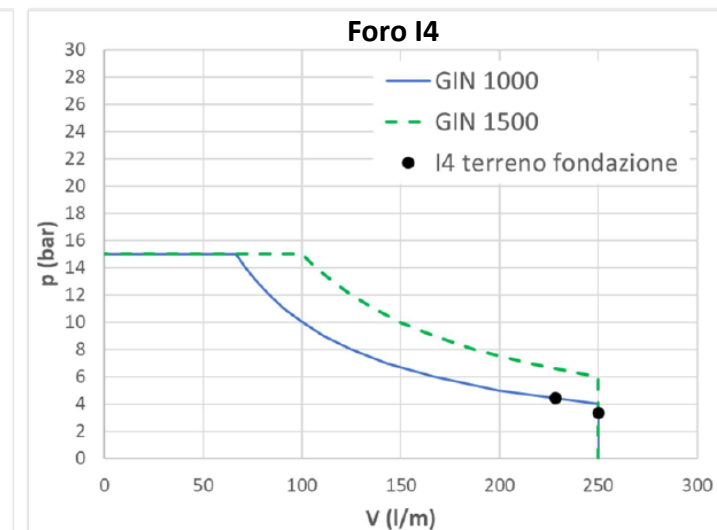
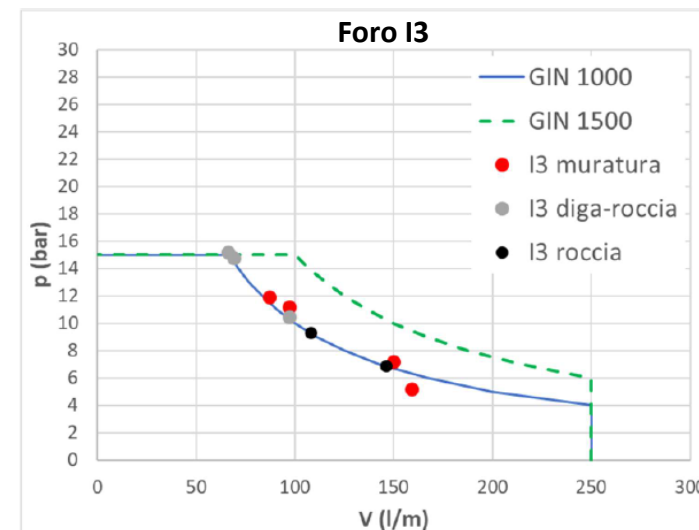
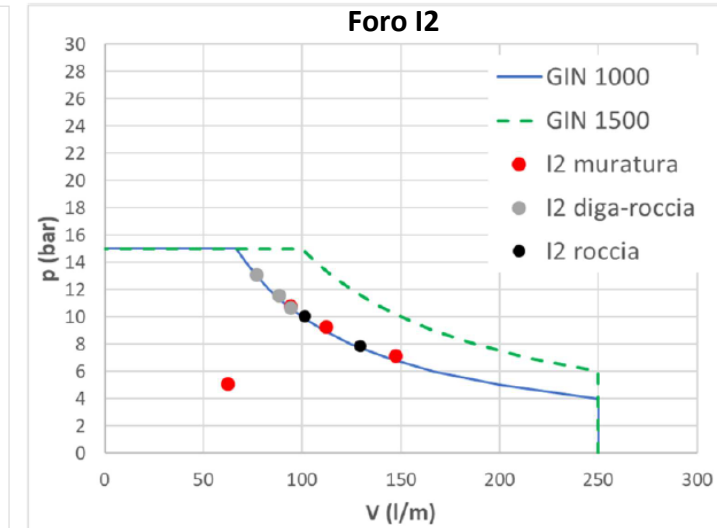
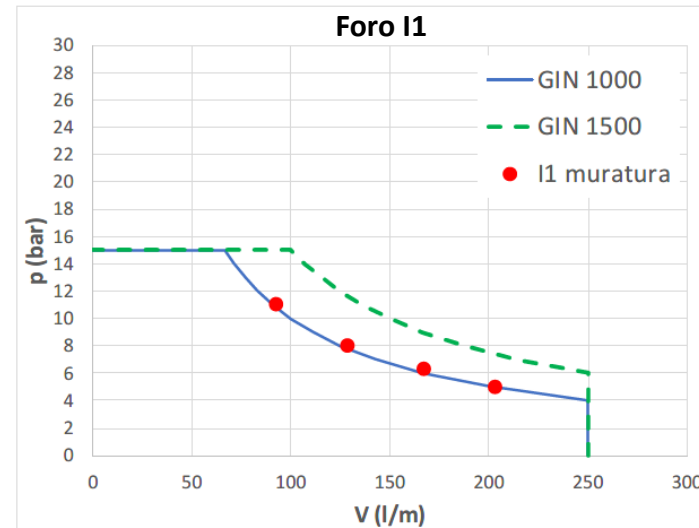
Settore iniettato	Volumi iniettati (l/m)	Pressioni massime (bar)	GIN
Corpo diga	50/200	4/12	1000
Interfaccia diga/roccia	50/100	10/15	1000
Roccia di fondazione	100/150	6/10	1000

La maggior parte delle iniezioni si sono arrestate per il raggiungimento del limite di GIN

Nella roccia di fondazione sono stati iniettati volumi compresi tra 100 e 150 l/m con Pmax tra 6 e 10 bar

All'interfaccia diga-roccia sono stati iniettati volumi compresi tra 50 e 100 l/m con Pmax superiori, comprese tra 10 e 15 bar

Nella muratura del corpo diga sono stati iniettati volumi tra 50 e 200 l/m con Pmax comprese tra 4 e 12 bar



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### Risultati del Campo Prove iniezioni e scelta dei parametri di iniezione

#### Sintesi dei risultati ottenuti dalle iniezioni del campo prove



Settore iniettato	Volumi iniettati (l/m)	Pressioni massime (bar)	GIN
Corpo diga	50/200	4/12	1000
Interfaccia diga/roccia	50/100	10/15	1000
Roccia di fondazione	100/150	6/10	1000

I risultati ottenuti suggeriscono un possibile innalzamento del limite di GIN, mantenendo invariati i limiti di P e V, con l'obiettivo di riuscire ad iniettare volumi maggiori nel caso in cui le pressioni di iniezione si mantengano relativamente basse

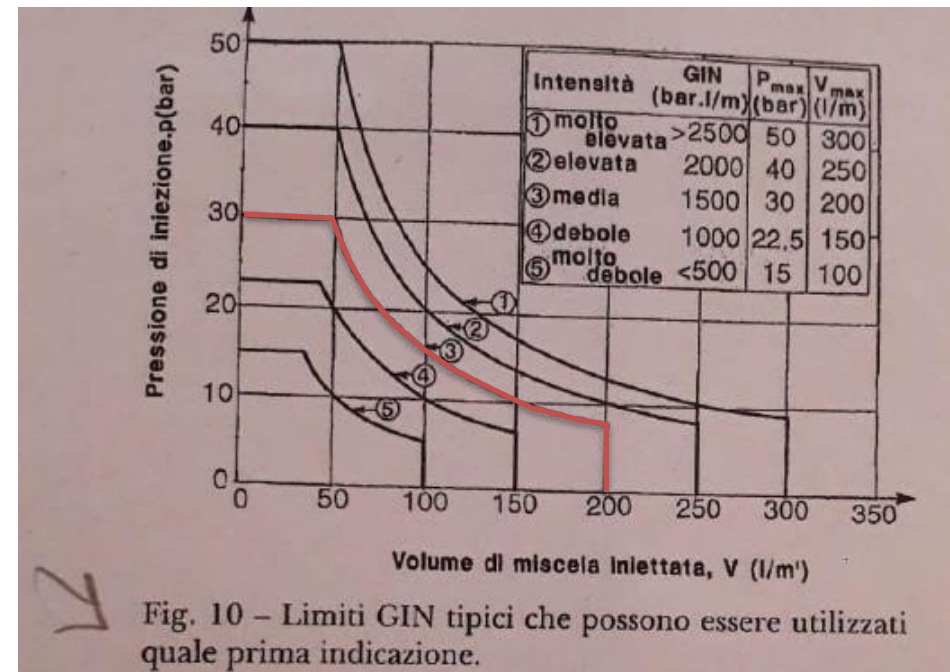


Parametri definiti  
per le iniezioni

$P_{max}$  20 bar  
 $V_{max}$  250 l/m  
 $GIN_{max}$  1500 bar l/m

Rispetto ai valori tipici di limiti di GIN suggeriti nella pubblicazione di Lombardi (Rivista Italiana di Geotecnica 2/99) il limite di GIN selezionato corrisponde ad un'intensità di iniezione media, mentre il limite di pressione scelto è quello relativo ad un'intensità di iniezione molto debole

Alzando pertanto il limite di GIN ma mantenendo bassa la  $P_{max}$  di iniezione si ha confidenza di non introdurre sforzi eccessivi specialmente all'interno della muratura del corpo diga





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

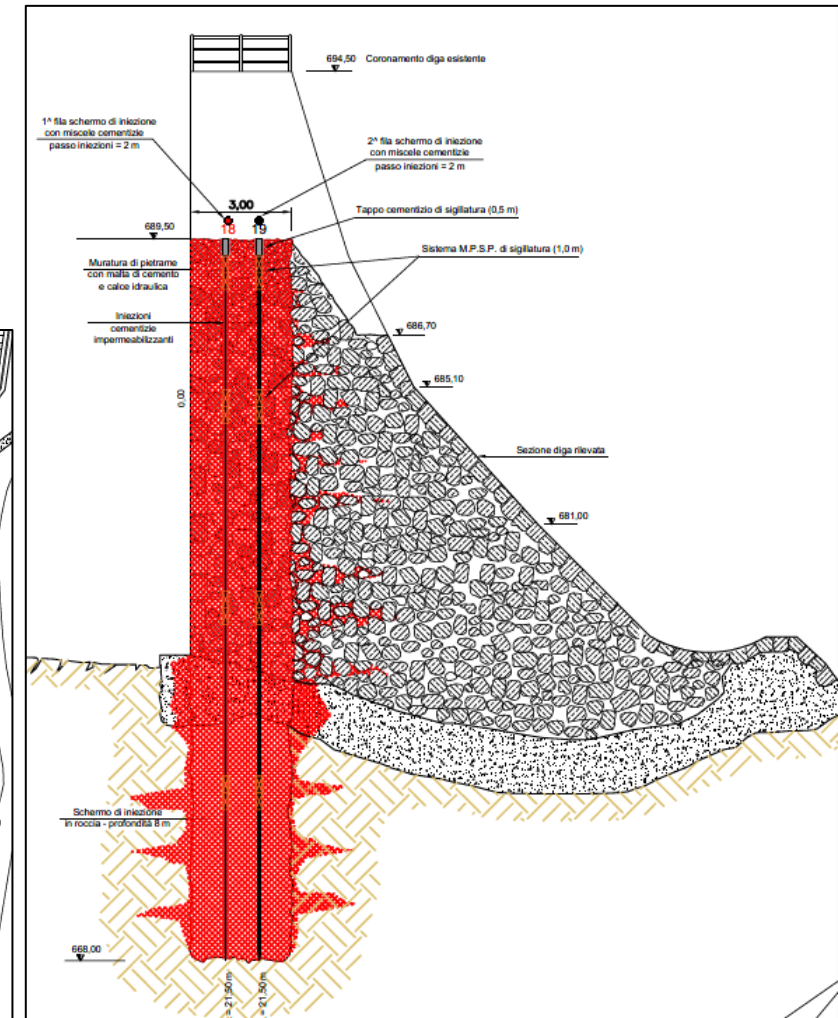
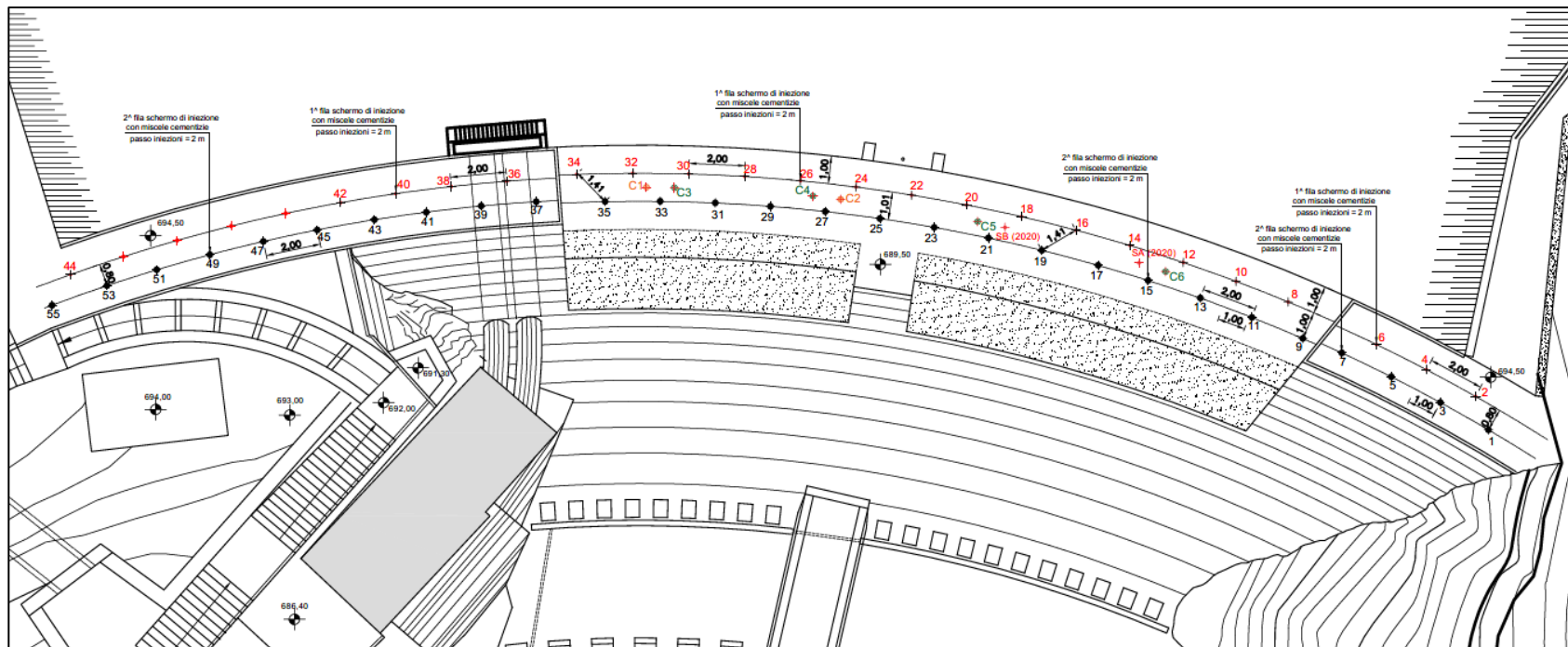
### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Lo scopo dell'intervento di iniezione è stato quello di consolidare la muratura esistente, l'interfaccia diga-roccia e la roccia per circa 8 m.

Inoltre ha consentito di realizzare uno schermo di impermeabilizzazione nello sbarramento e all'interfaccia diga-roccia riducendone le sottopressioni alla base

E' stata realizzata una doppia fila di iniezioni (n. 50 fori in totale) sulla superficie del nuovo sfioratore e sulle due spalle diga a quota 694.50 m



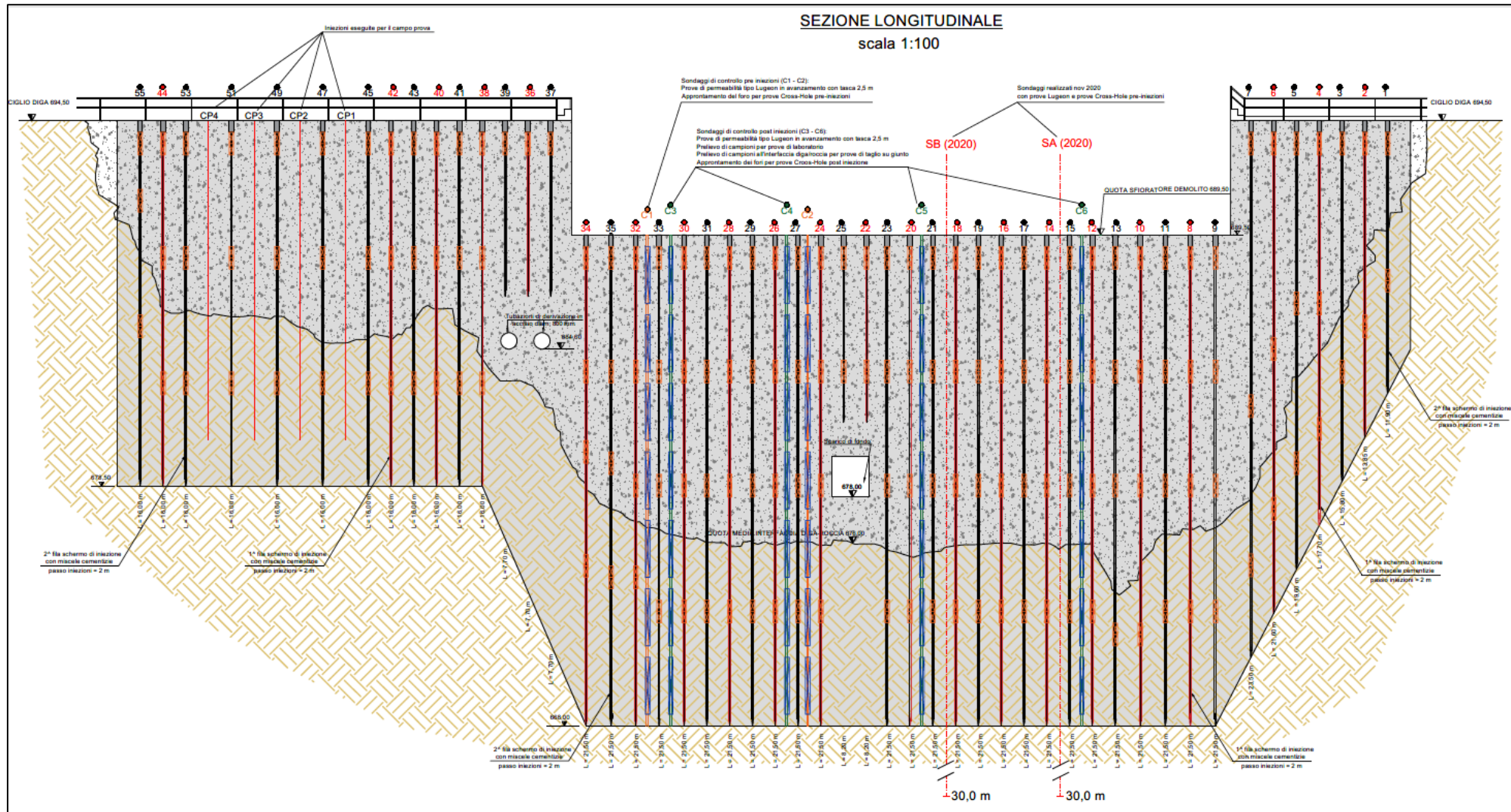
## MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Technical cross-section diagram of a dam structure. The diagram illustrates the internal layers and components of the dam, including the existing crest, injection screens, sealing system, and the dam body itself. Key features and labels include:

- Coronamento diga esistente**: Existing dam crest, elevation 694.50.
- 1ª fila schermo di iniezione con miscela cementizia**: First row of injection screen with cementitious mixture, spacing = 2 m.
- 2ª fila schermo di iniezione con miscela cementizia**: Second row of injection screen with cementitious mixture, spacing = 2 m.
- Tappo cementizio di sigillatura (0.5 m)**: Cementitious sealing plug (0.5 m).
- Sistema M.P.S.P. di sigillatura (1.0 m)**: M.P.S.P. sealing system (1.0 m).
- Muratura di pietrame con malta di cemento e calce idraulica**: Rubble masonry with cement and hydraulic lime mortar.
- Iniezioni cementizie impermeabilizzanti**: Cementitious waterproofing injections.
- Sezione diga rilevata**: Raised dam section.
- Schermo di iniezione in roccia - profondità 8 m**: Injection screen in rock - depth 8 m.
- Elevations**: 695.50, 686.70, 685.10, 681.00, 668.00.
- Dimensions**: 3.00, 0.08, 2.50m, 2.50m.



## MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI



Schema delle iniezioni nel settore di spalla sinistro

Fori di iniezioni primari	Fori di iniezione secondari	Lunghezza perforazione	Tappo cementizio di sigillatura (0,5 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)
2		14,0	-0,25	-1,0	-9,0	
4		18,0	-0,25	-1,0	-8,0	-13,5
6		21,5	-0,25	-1,0	-10,0	-17,0
	1	12,0	-0,25	-1,0	-7,0	
	3	16,0	-0,25	-1,0	-11,0	
	5	19,50	-0,25	-1,0	-8,0	-15,0
	7	23,50	-0,25	-1,0	-12,5	-19,5

Schema delle iniezioni nel settore centrale dello scarico di superficie

Fori di iniezioni primari	Fori di iniezione secondari	Lunghezza perforazione	Tappo cementizio di sigillatura (0,5 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)
8		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
10		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-17,5
12		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
14		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
16		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
18		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
20		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
22		8,20	-0,25	-1,0	-6,0		
24		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
26		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
28		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
30		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
32		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-15,0
34		21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-9,5	-14,5
	9	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	11	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	13	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-17,5
	15	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	17	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	19	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	21	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	23	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	25	8,20	-0,25	-1,0	-6,0		
	27	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	29	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	31	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	33	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-11,0	-16,5
	35	21,5	-0,25	-1,0	-6,0	-10,0	-15,0

Schema delle iniezioni nel settore di spalla destro

Fori di iniezioni primari	Fori di iniezione secondari	Lunghezza perforazione	Tappo cementizio di sigillatura (0,5 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)	Sistema M.P.S.P. (1,0 m)
36		7,70	-0,25	-1,0		
38		16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
40		16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
42		16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
44		16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	37	7,70	-0,25	-1,0		
	39	7,70	-0,25	-1,0		
	41	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	43	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	45	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	47	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	49	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	51	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	53	16,0	-0,25	-1,0	-6,0	-11,5
	55	16,0	-0,25	-1,0	-3,5	-9,0



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

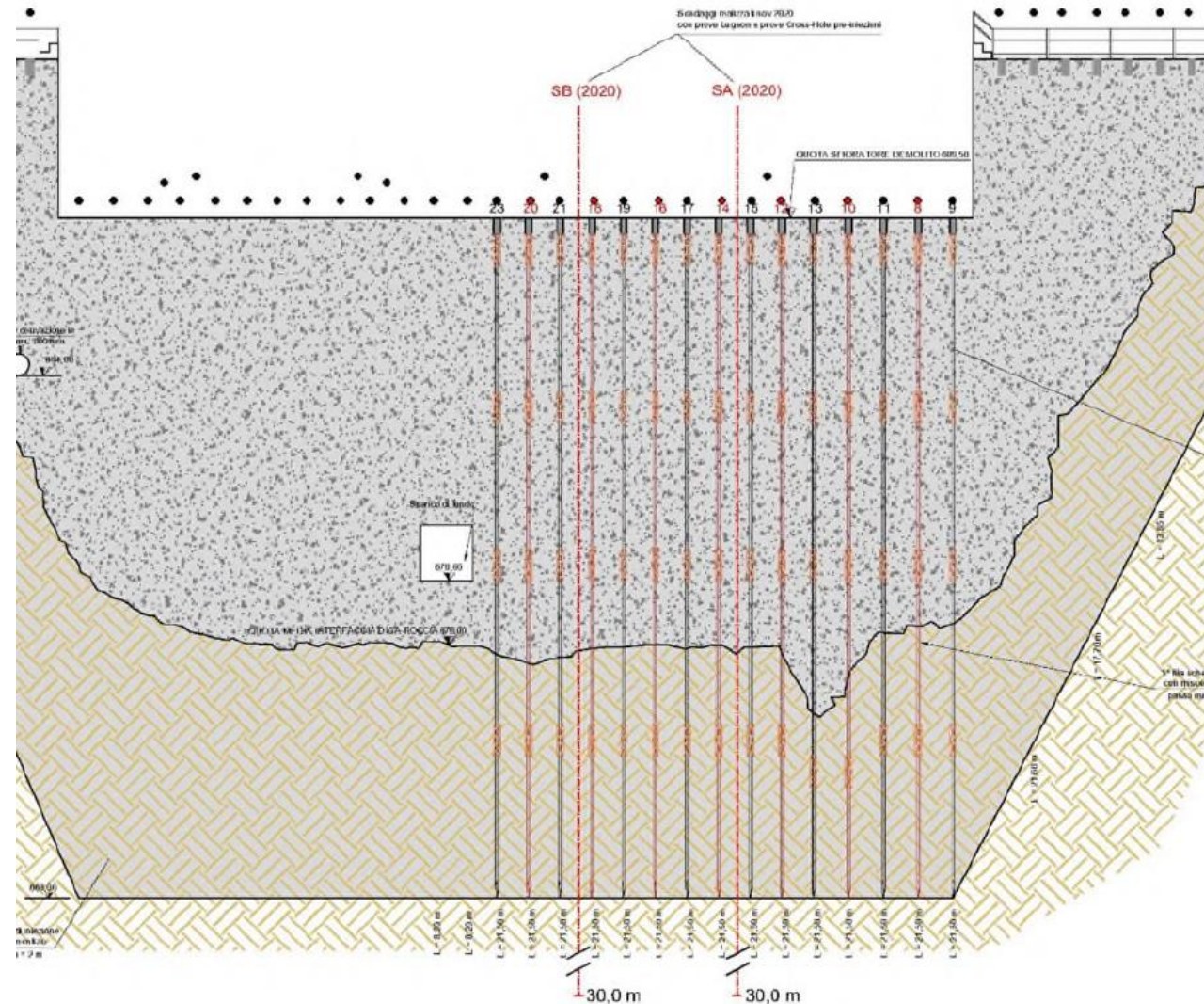
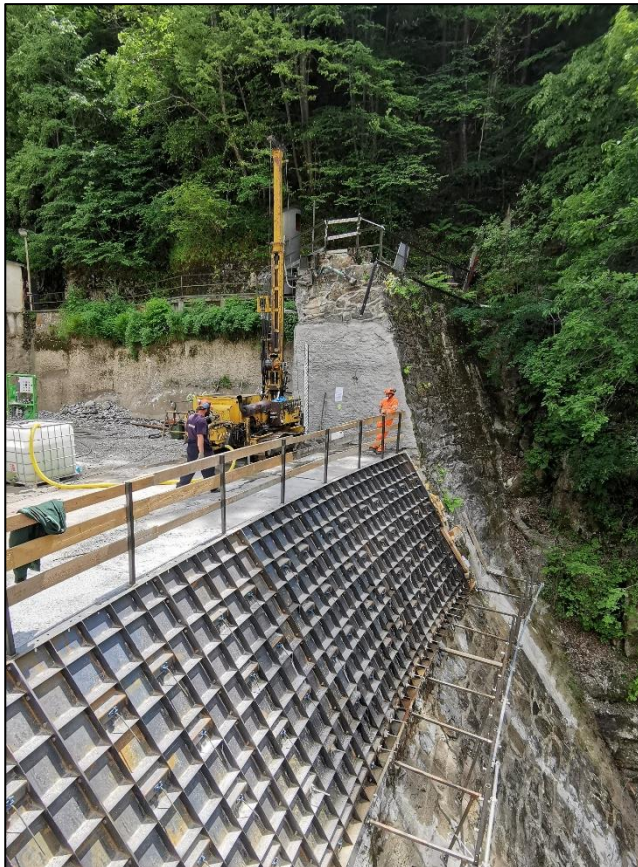
## *Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Fasi di lavoro

Fase 1: Realizzazione delle iniezioni nella metà sinistra del nuovo sfioratore di superficie





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

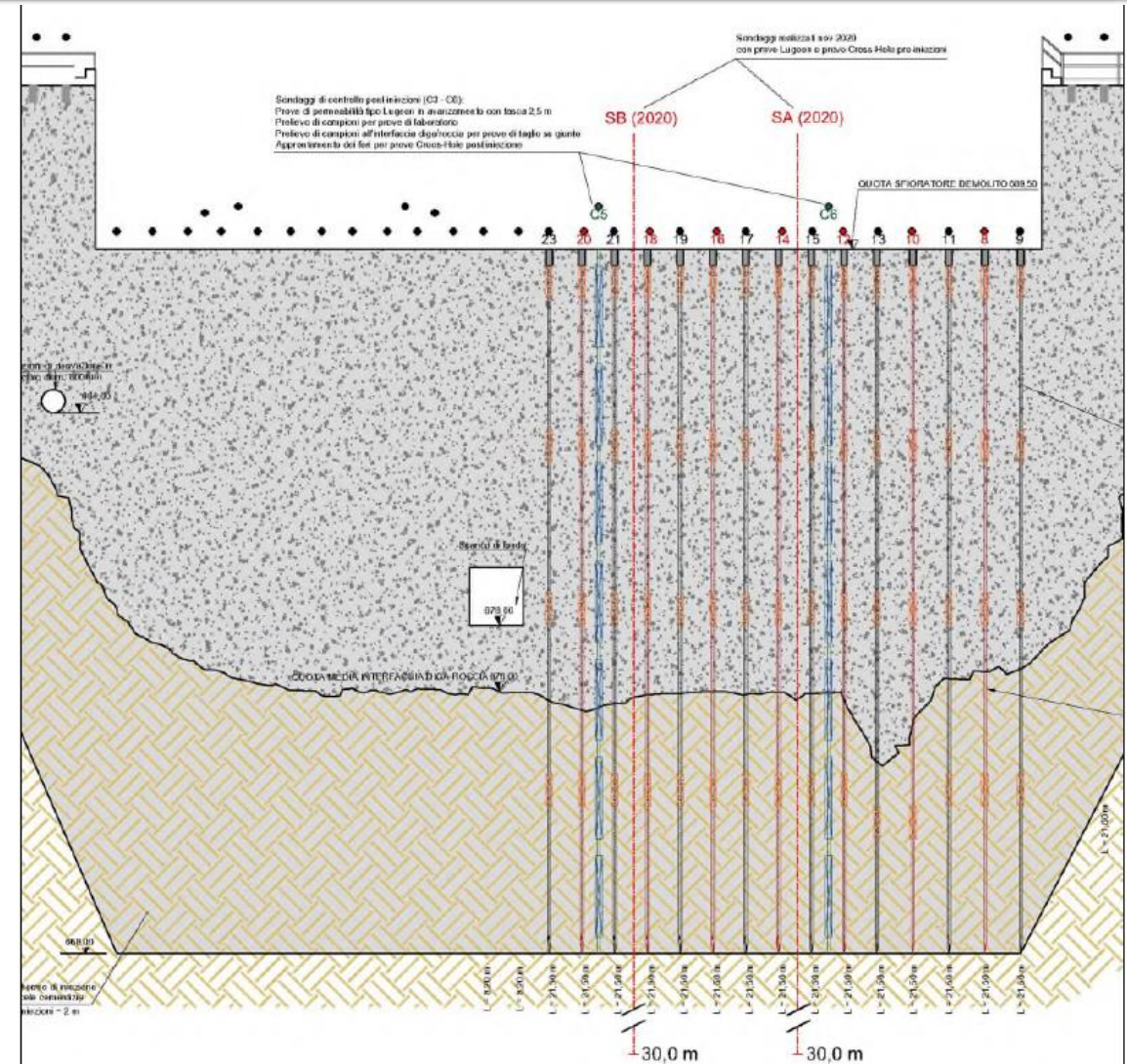
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Fasi di lavoro

#### Fase 2: Realizzazione dei sondaggi di controllo C5 e C6





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

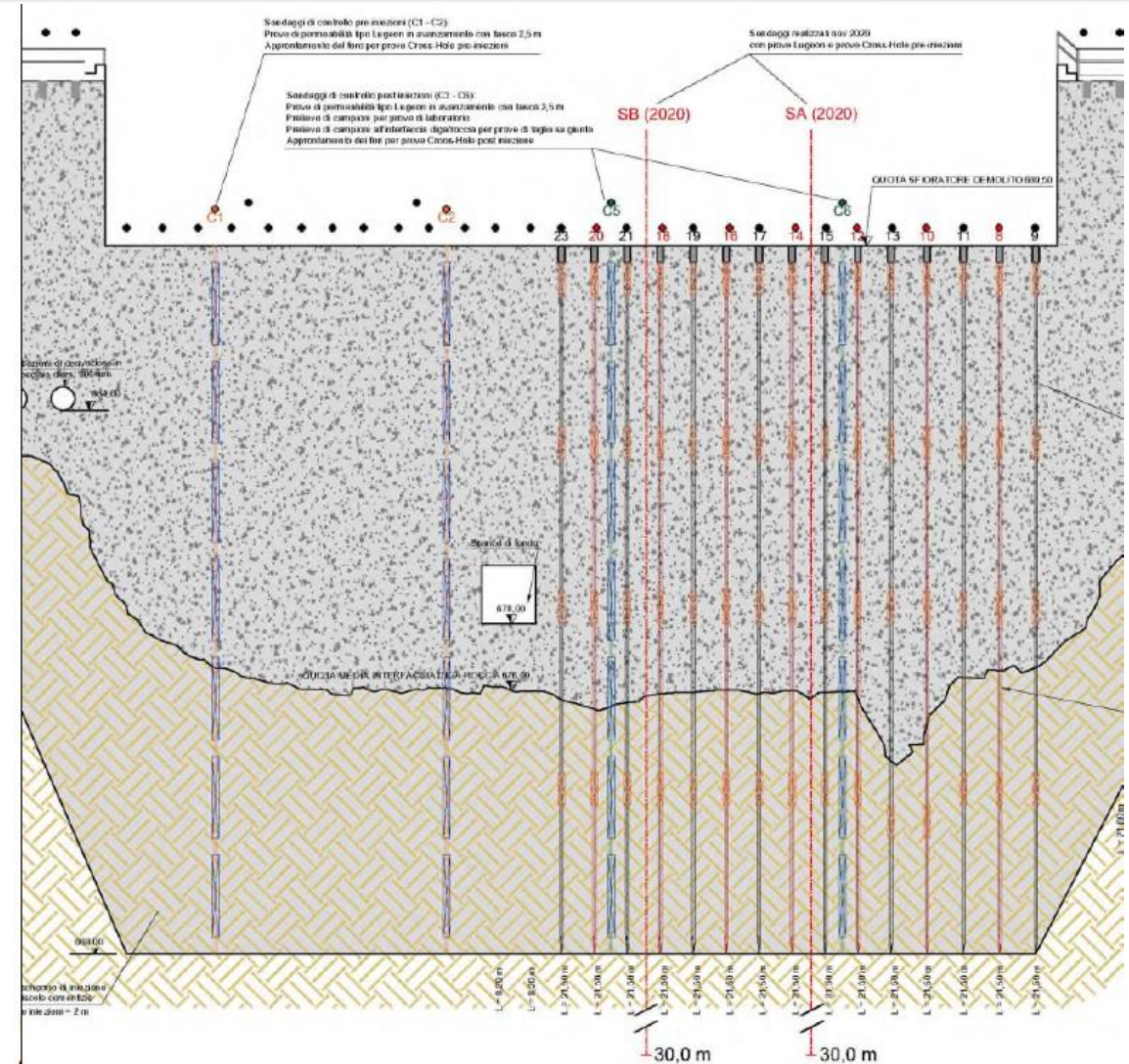
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Fasi di lavoro

Fase 3: Realizzazione dei sondaggi di controllo C1 e C2 pre-iniezioni della metà dx del nuovo sfioratore









# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

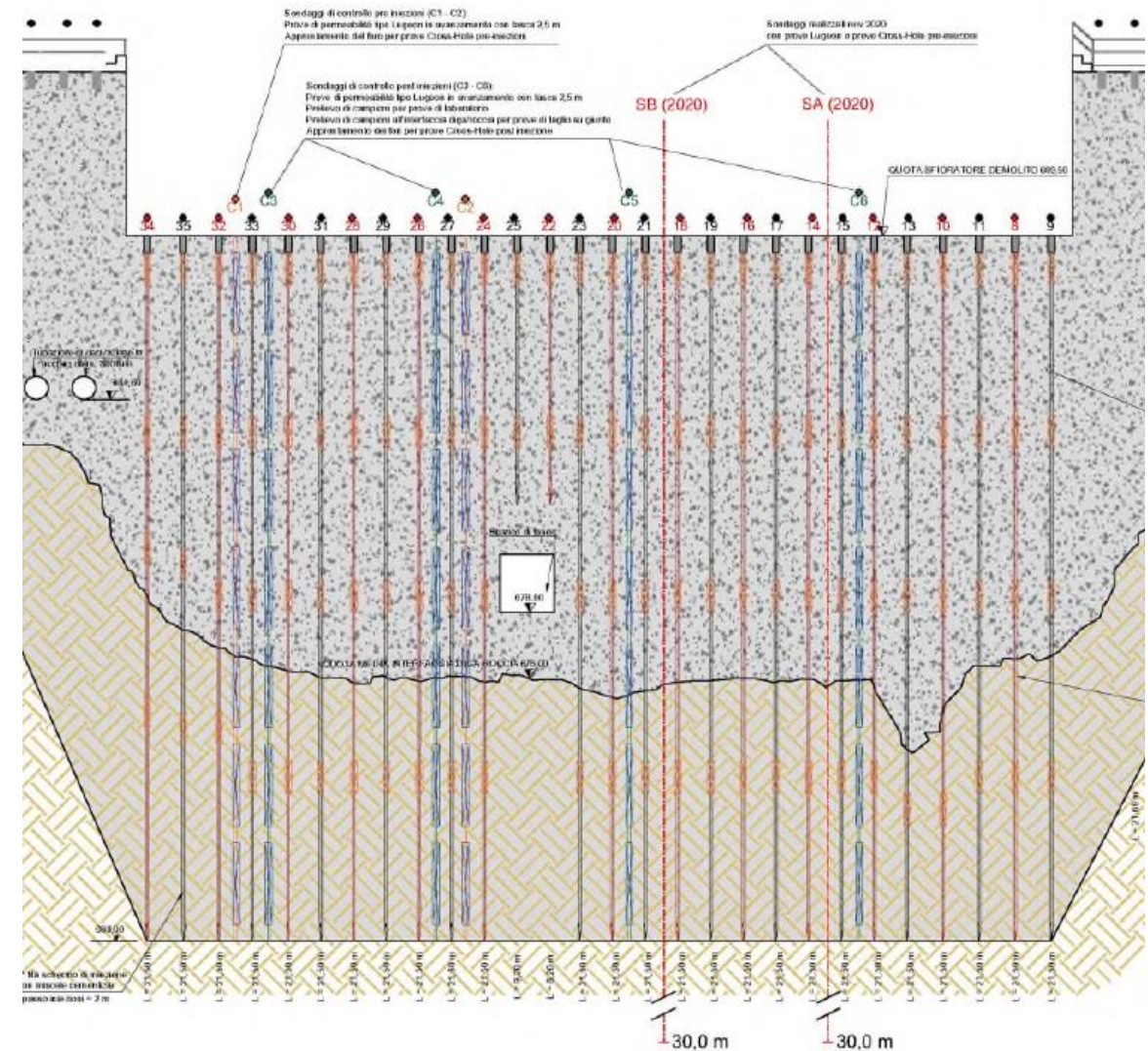
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Fasi di lavoro

#### Fase 5: Realizzazione dei sondaggi di controllo C3 e C4





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

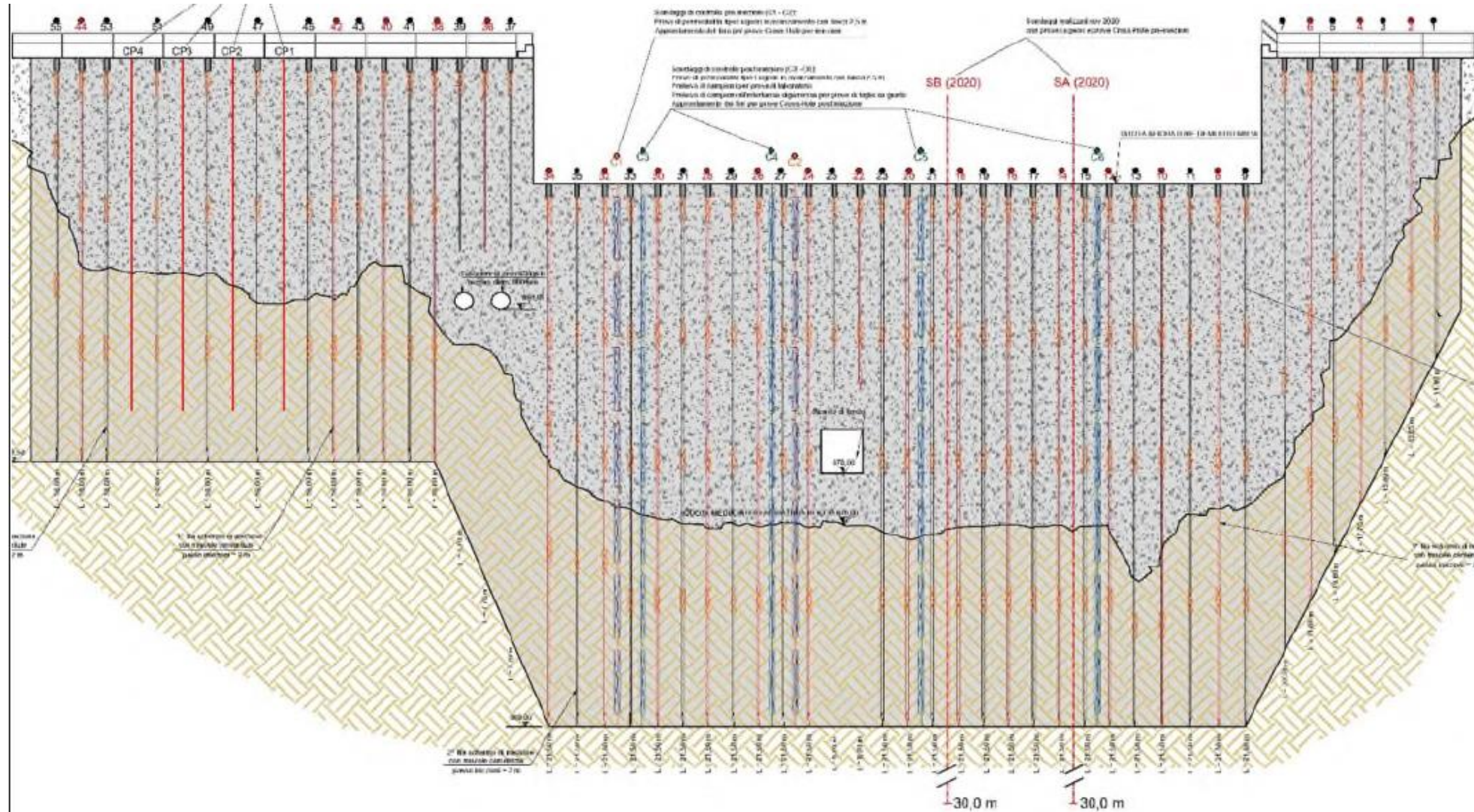
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Fasi di lavoro

Fase 6: Realizzazione delle iniezioni  
sulle spalle destra e sinistra





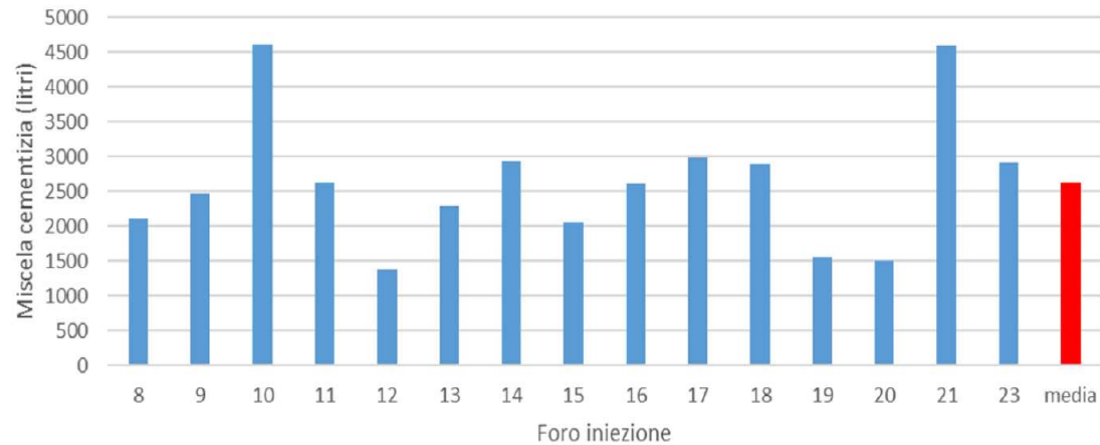
# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

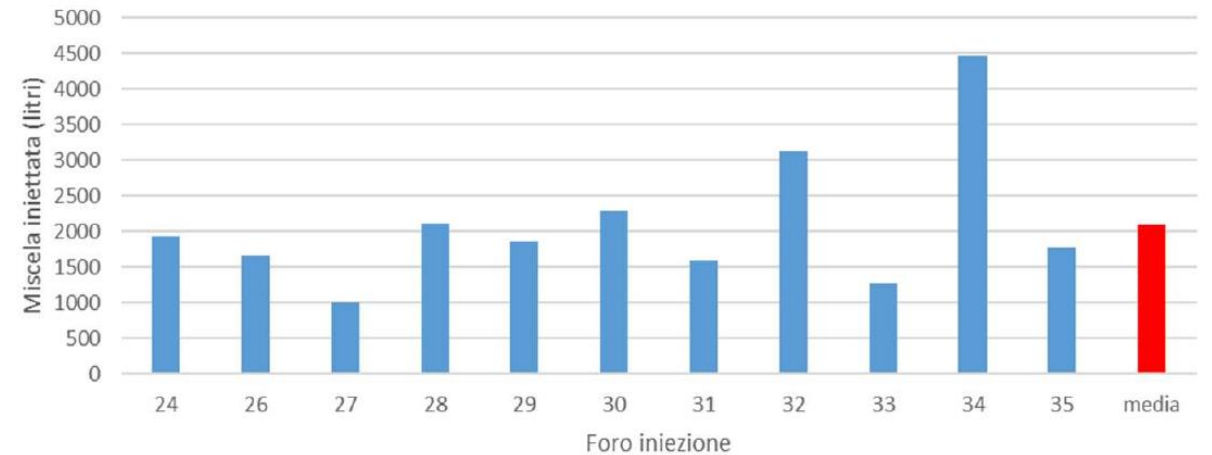
### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

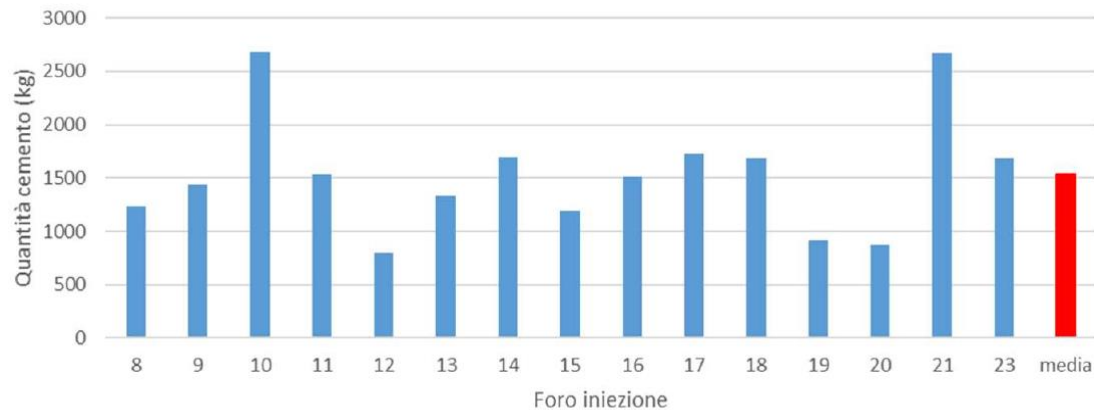
Assorbimento totale (litri miscela) lato sx sfioratore



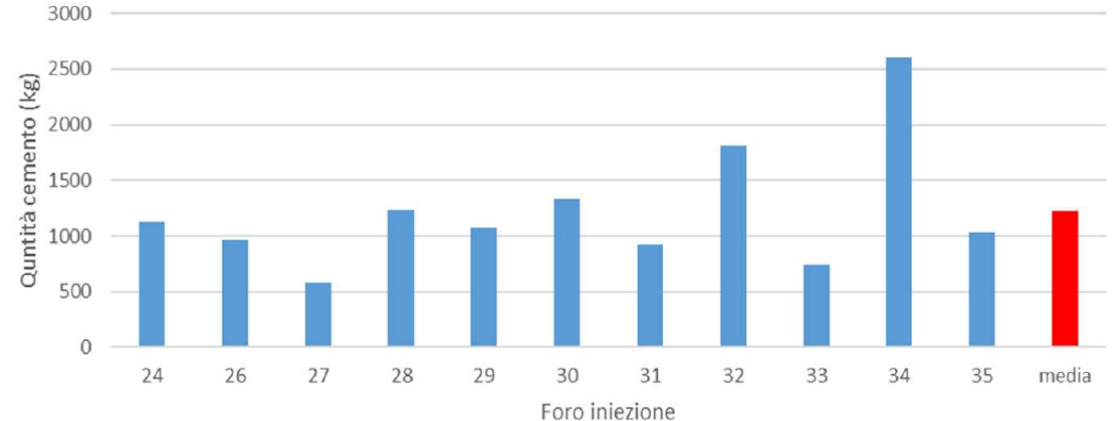
Assorbimento totale (litri miscela) lato dx sfioratore



Assorbimento totale (kg cemento) lato sx



Assorbimento totale (kg cemento) lato dx

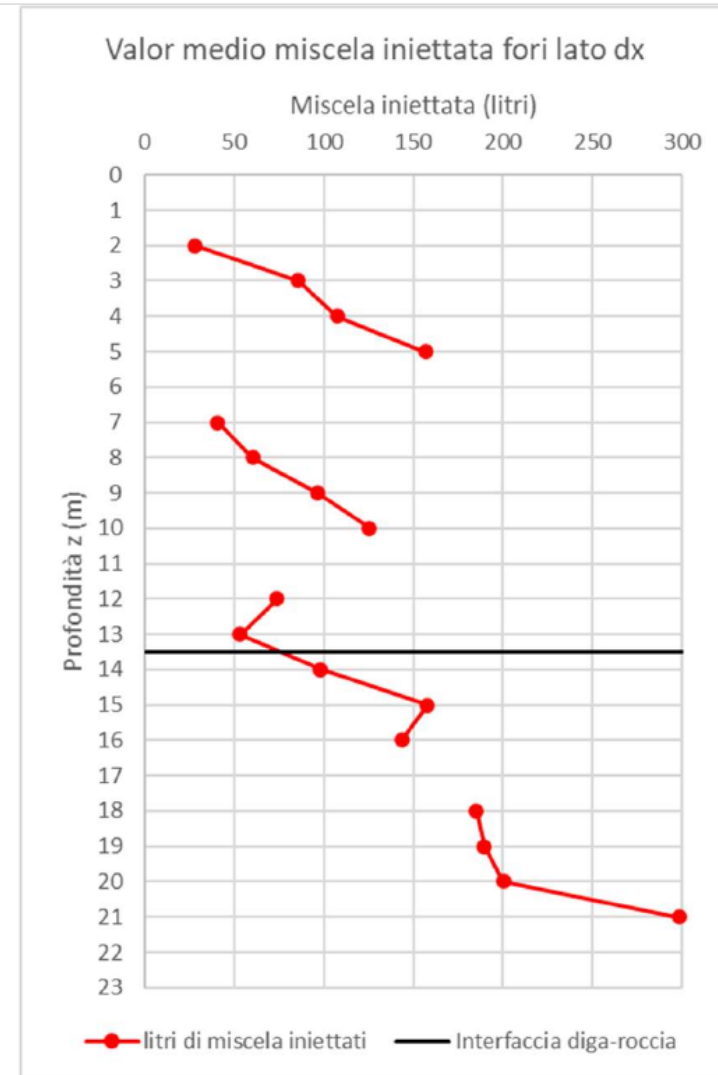
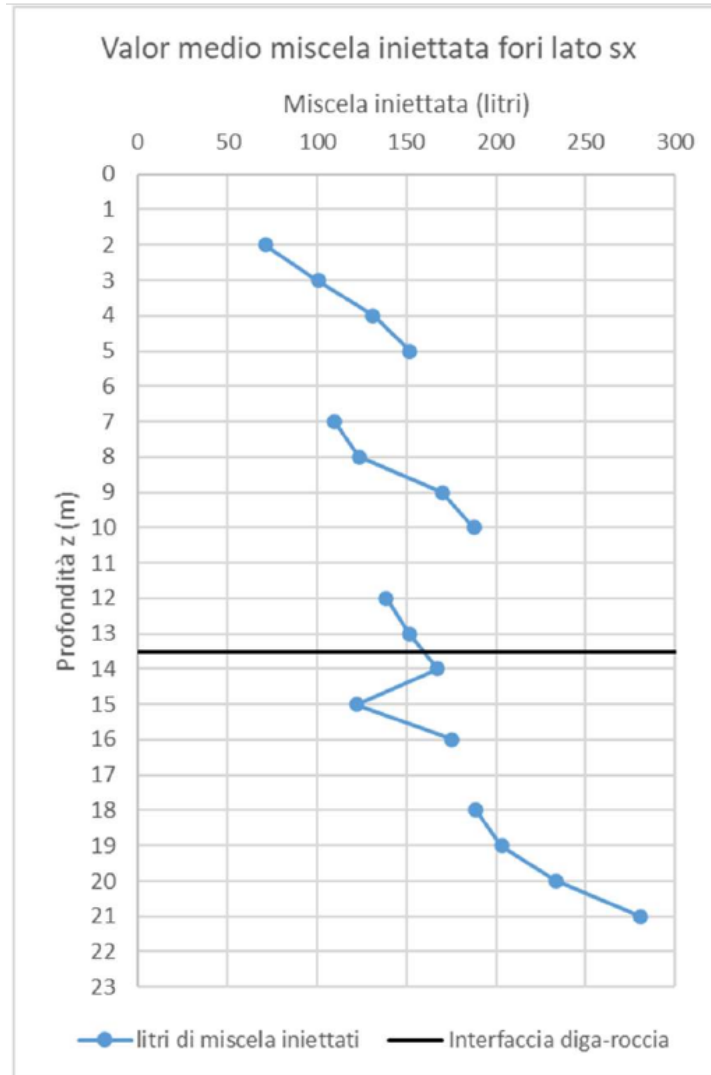


# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI



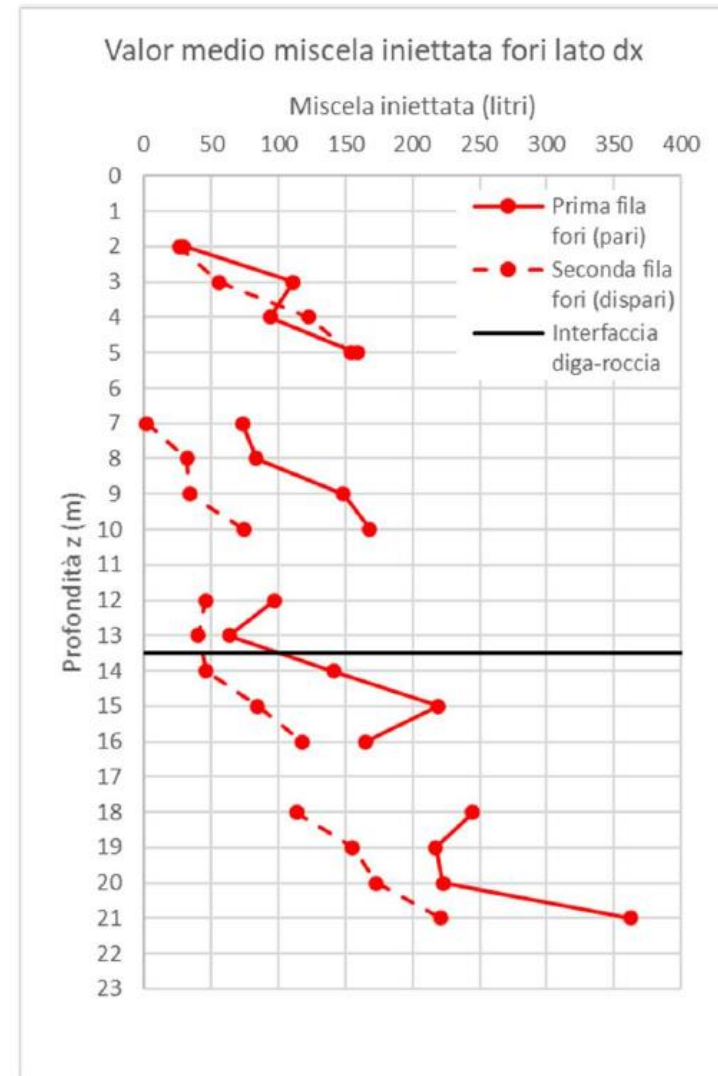
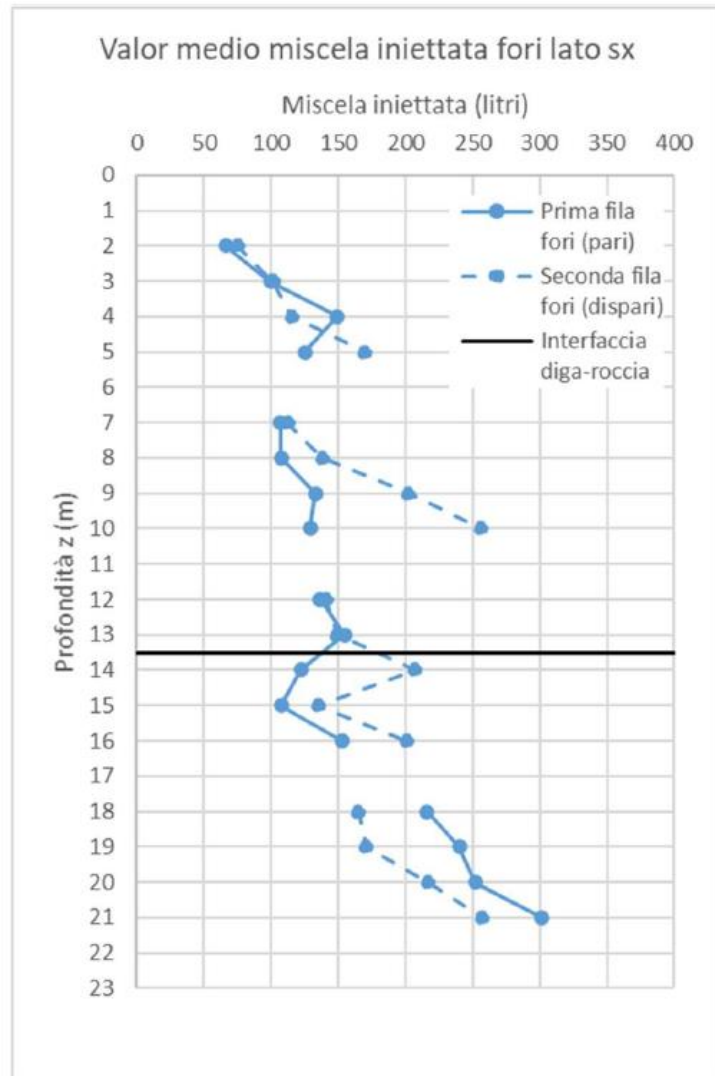


# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI



# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## *Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Riscontri delle iniezioni dalle stratigrafie  
dei sondaggi di controllo post iniezione





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## *Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Riscontri delle iniezioni dalle stratigrafie  
dei sondaggi di controllo post iniezione





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## *Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione*

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Riscontri delle iniezioni dalle stratigrafie  
dei sondaggi di controllo post iniezione





# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Parametri di controllo e verifica delle iniezioni



Lettera di approvazione del Progetto esecutivo di variante dalla DGD (nota prot. n. 8974 del 29 aprile 2021) dove, relativamente alla verifica dei risultati ottenuti dall'attività di iniezione, si richiede di identificare un parametro di controllo del valore atteso

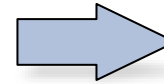


Efficacia delle iniezioni effettuate (incremento delle proprietà meccaniche e idrauliche) riferiti a valori di velocità di propagazione delle onde P e ai valori di permeabilità K

#### Confronto pre e post iniezione

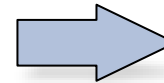
Settore diga	Indagini pre-iniezioni	Indagini post-iniezioni	Prove di controllo
Parte sfioratore sx	Sondaggi SA - SB	Sondaggi C5 – C6	Cross-Hole + Lugeon
Parte sfioratore dx	Sondaggi C1 - C2	Sondaggi C3 – C4	Cross-Hole + Lugeon

Prove di permeabilità



L'esito delle iniezioni viene ritenuto positivo e soddisfacente se la permeabilità K si riduce di almeno un ordine di grandezza rispetto ai valori registrati pre-iniezione (si considera come riferimento un valore di permeabilità atteso uguale o inferiore a  $1,0 \cdot 10^{-6}$  m/s)

Cross-Hole



L'esito delle iniezioni viene ritenuto positivo e soddisfacente se l'incremento nelle velocità delle onde P risulta superiore a 500-1000 m/sec o comunque raggiunto una velocità target delle onde P  $> 3000$  m/sec

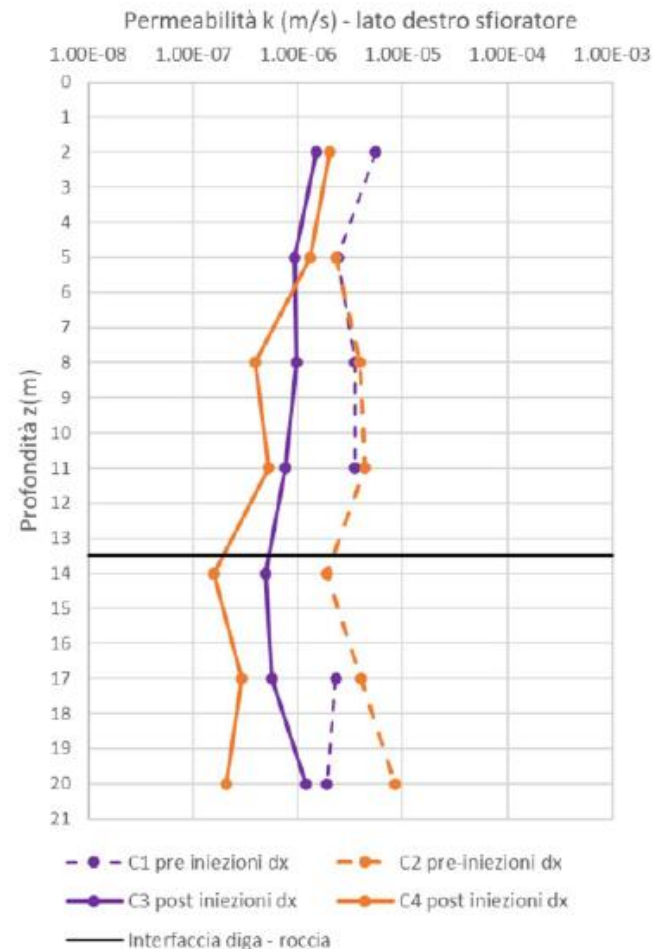
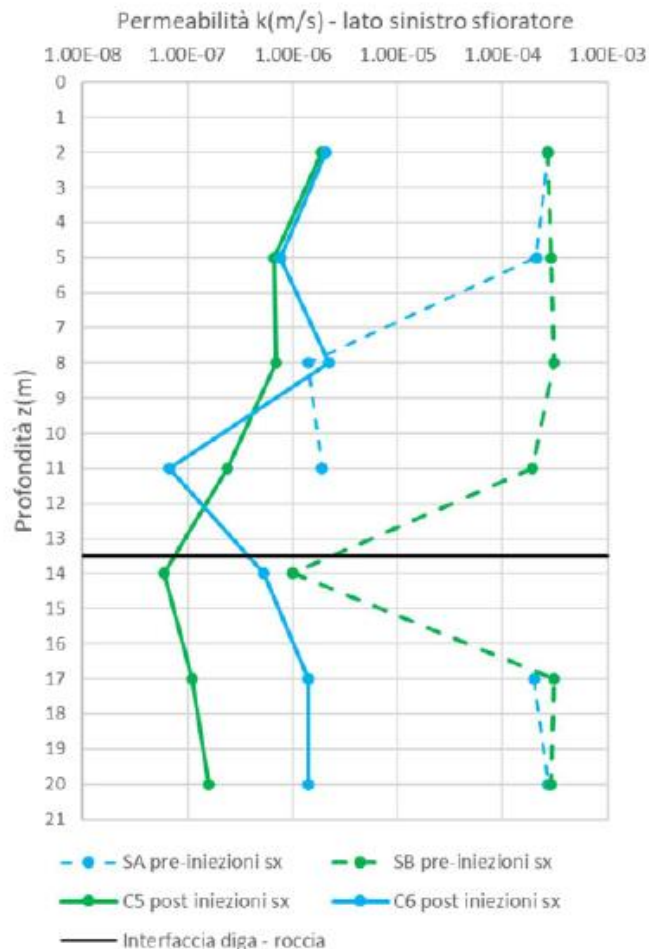
# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

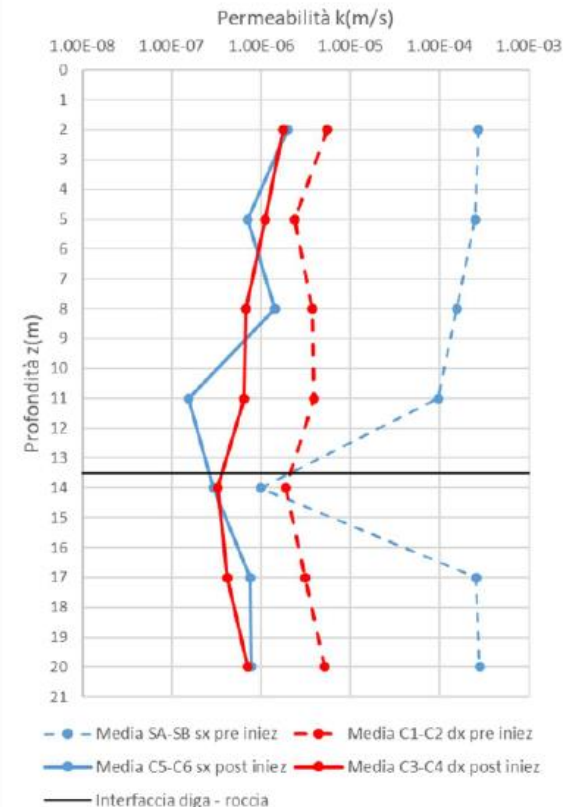
### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

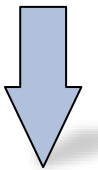
#### Prove di permeabilità Lugeon



#### Media dei valori di $k$ ottenuti sui due lati dello sfioratore pre e post iniezione



Regularizzazione di comportamento ottenuta post trattamento di iniezione, sia in termini spaziali lungo lo sviluppo dello sfioratore, sia in direzione verticale lungo le profondità



Dal punto di vista dei risultati ottenuti in termini di  $k$  le iniezioni hanno avuto esito positivo e soddisfacente



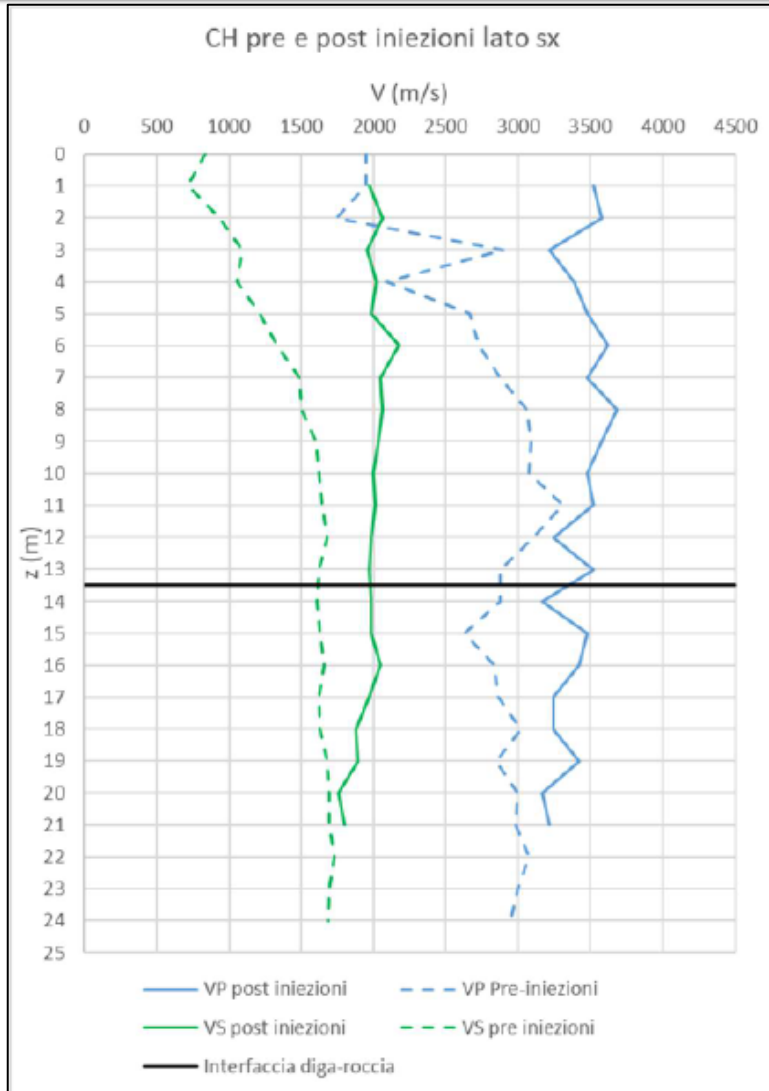
# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

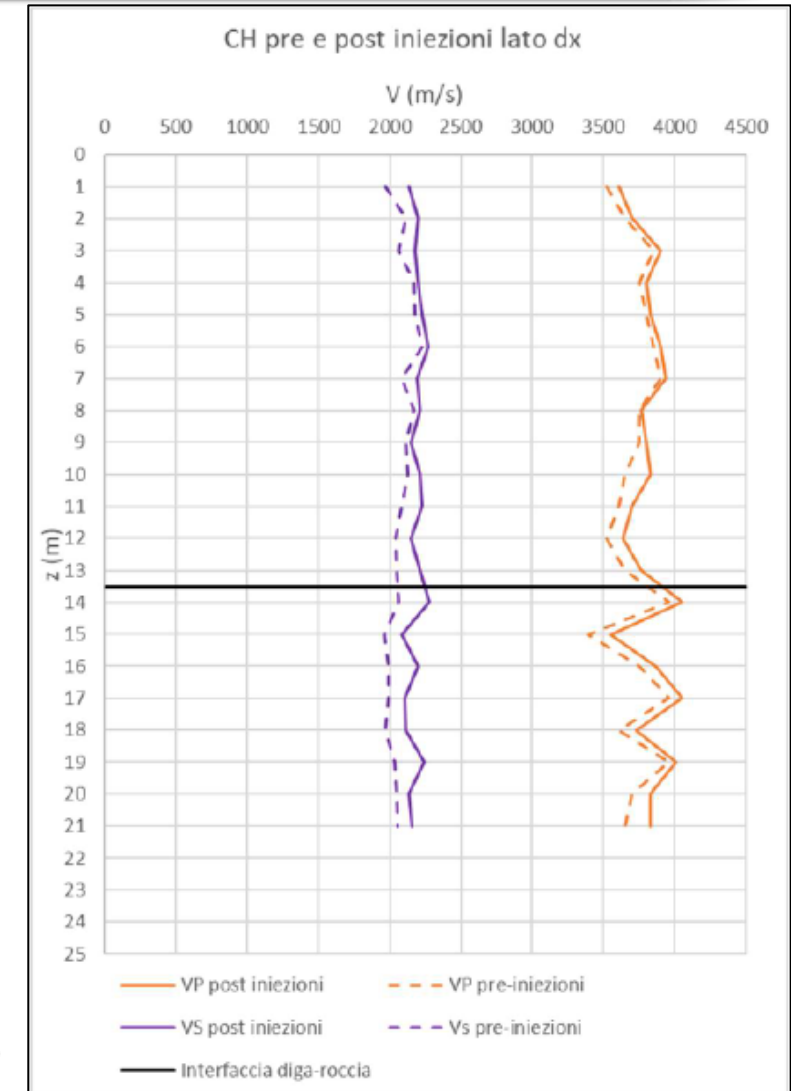
### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

#### Prove Cross-Hole



Sfioratore sinistro



Sfioratore destro

# Diga di Pagnona - Interventi per il miglioramento idraulico e strutturale della diga

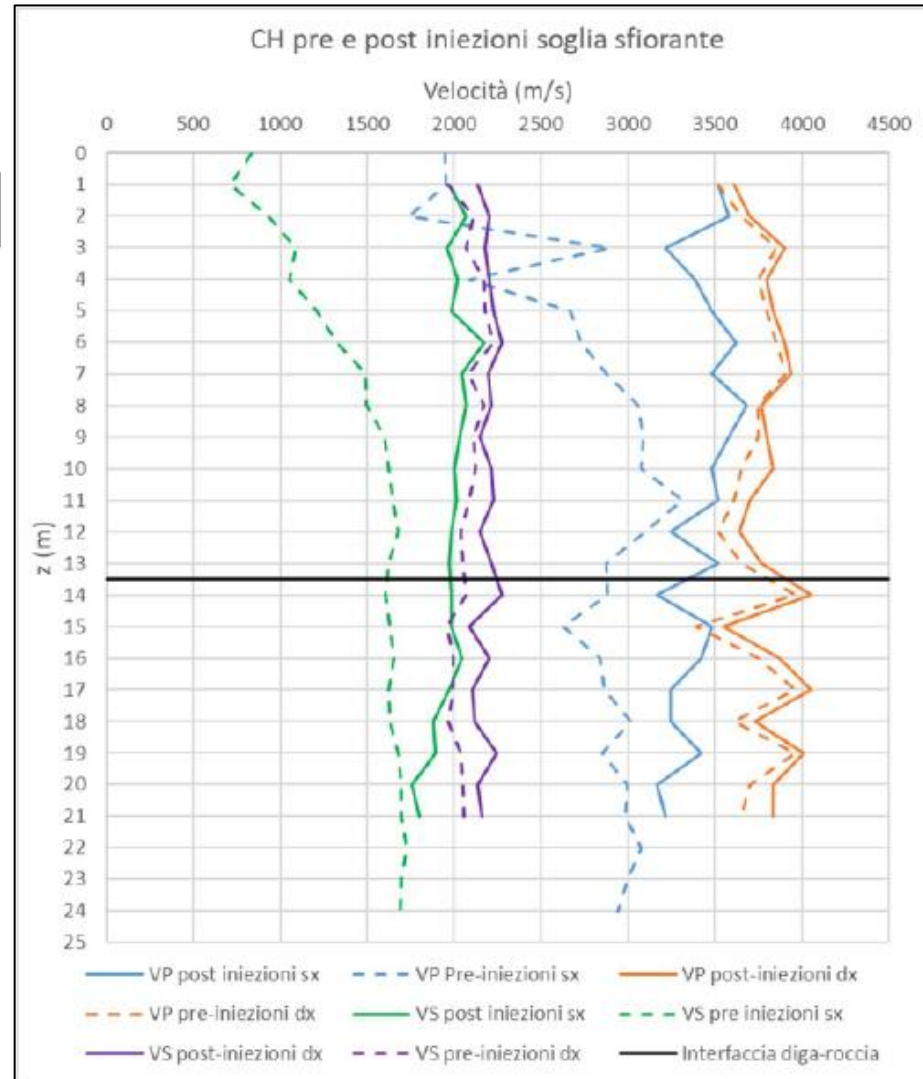
## Focus sul miglioramento strutturale: contributo delle iniezioni in corpo diga ed in fondazione

### INIEZIONI IN CORPO DIGA E NELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

#### MODALITÀ ATTUATIVE DELL'INTERVENTO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI VERIFICA DEI RISULTATI

Prove Cross-Hole

Velocità onde P e S pre e post iniezione



Regularizzazione di comportamento ottenuta post trattamento di iniezione, sia in termini spaziali lungo lo sviluppo dello sfioratore, sia in direzione verticale lungo le profondità



Il target di valore atteso di VP > di 3000 m/s risulta sempre abbondantemente superato, e pertanto il trattamento di iniezione può essere considerato positivo e soddisfacente anche da questo punto di vista