

## **Omaggio a due dighe centenarie : Vulci e Pagnona**

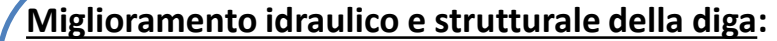
### ***Diga di Pagnona – INTERVENTI PER IL MIGLIORAMENTO IDRAULICO E STRUTTURALE DELLA DIGA***

***Variante al progetto autorizzato: principali obiettivi e finalità. Scelte progettuali***

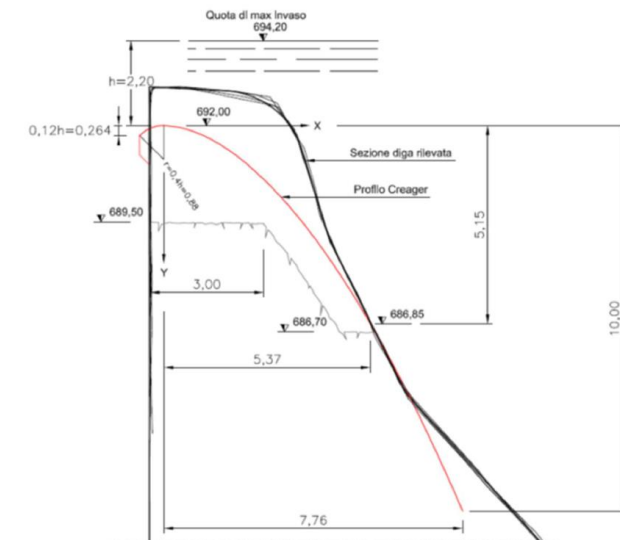
***Raffaele Figini***

***Enel Green Power Italia srl***

## LEGENDA

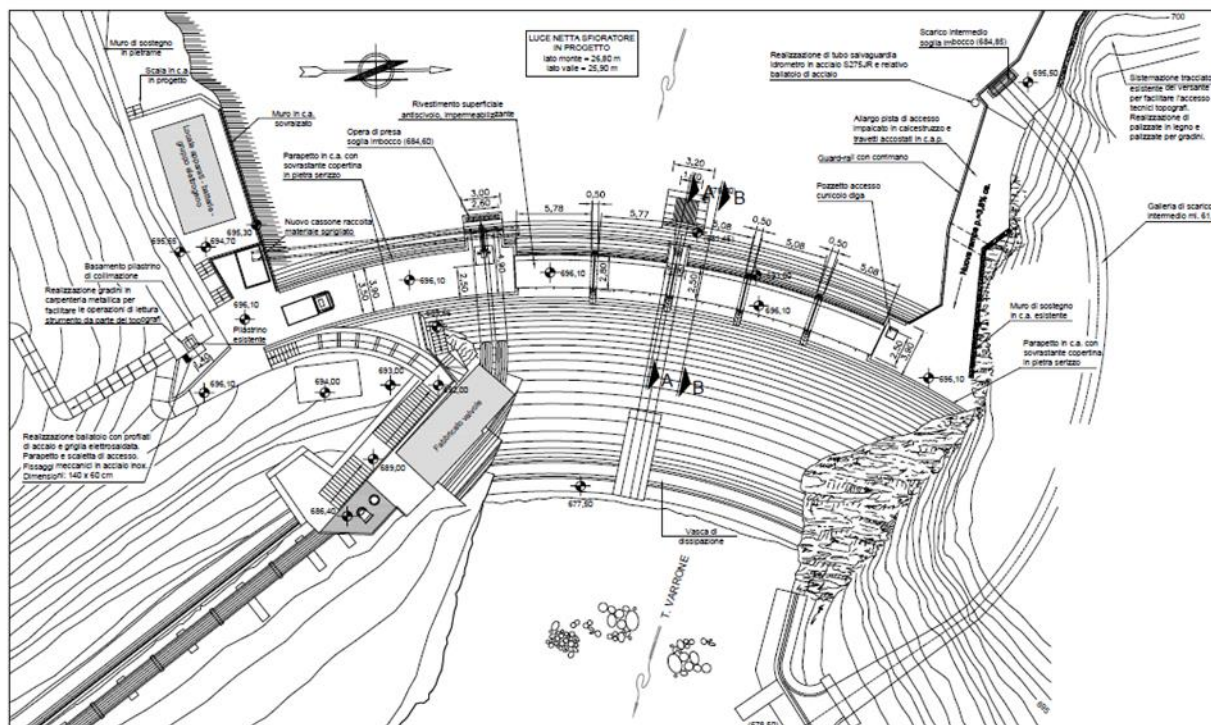


- Nuovo sfioratore sagomato con profilo Creager in grado di esitare la  $Q_{1000}$  rivalutata post evento 2019 ( $Q_{1000} = 180 \text{ mc/s}$ ), abbassato di 1 m rispetto a originale, su due luci
- No placcaggio cls a monte, quota max invaso +0.2 m rispetto originale (694.20 m slm)
- Iniezioni consolidamento in corpo diga e nella roccia di fondazione
- Sopralzo spalle diga (altezza diga mantenuta uguale a quella del progetto autorizzato, quota coronamento 696.10 m slm)
- Vasca di dissipazione a valle diga

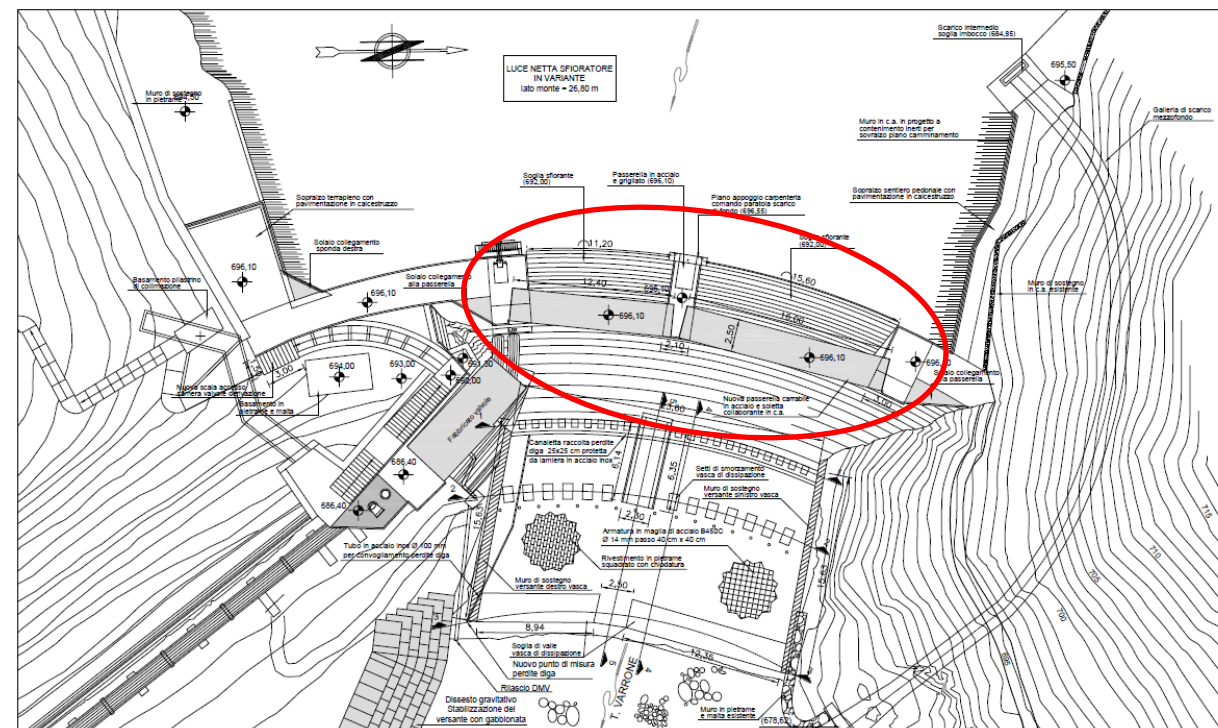


## Confronto planimetrico progetto autorizzato vs variante progettuale

PROGETTO AUTORIZZATO  
PLANIMETRIA GENERALE DIGA  
scala 1:200



VARIANTE AL PROGETTO AUTORIZZATO  
PLANIMETRIA GENERALE DIGA  
scala 1:200



- Passerella su due campate anziché cinque e spostata a valle rispetto al ciglio sfiorante
- Vasca di dissipazione a valle diga



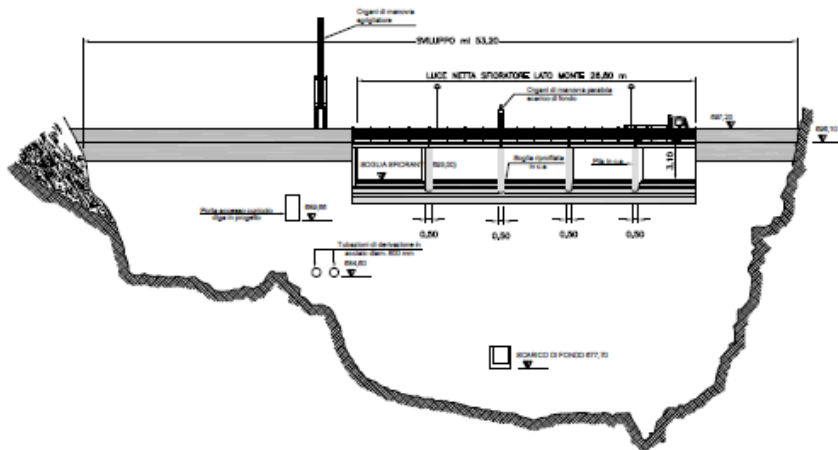


# Variente al progetto autorizzato (2020): principali obiettivi e scelte progettuali

Confronto vista da valle e sezione longitudinale progetto autorizzato vs variante progettuale

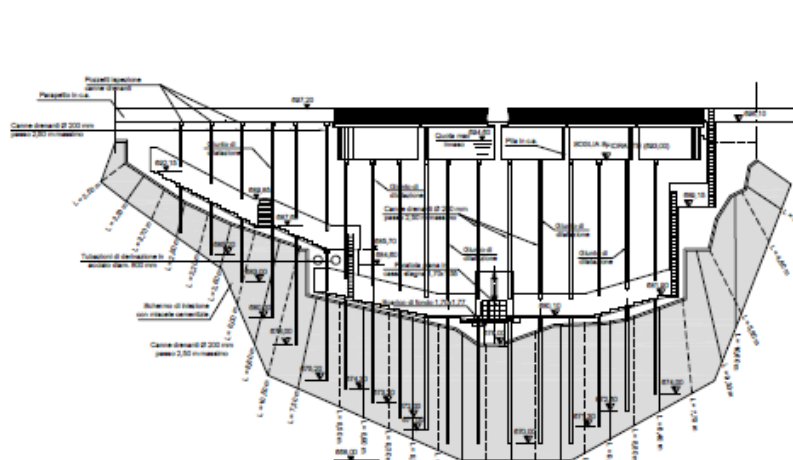
PROGETTO AUTORIZZATO

scala 1:200



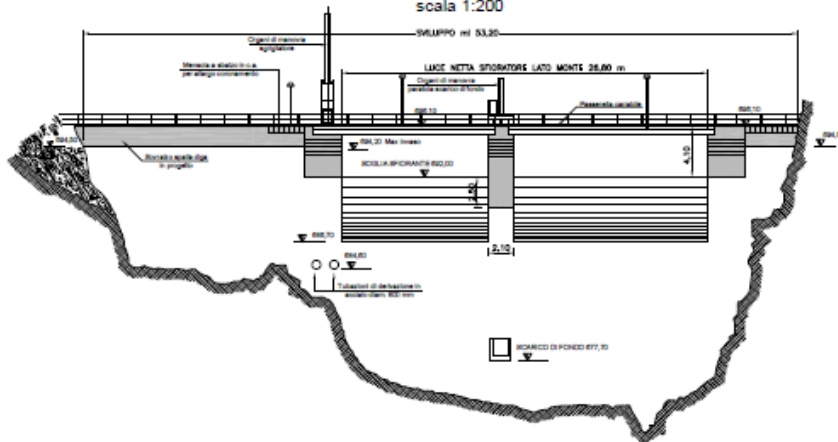
PROGETTO AUTORIZZATO

scala 1:200



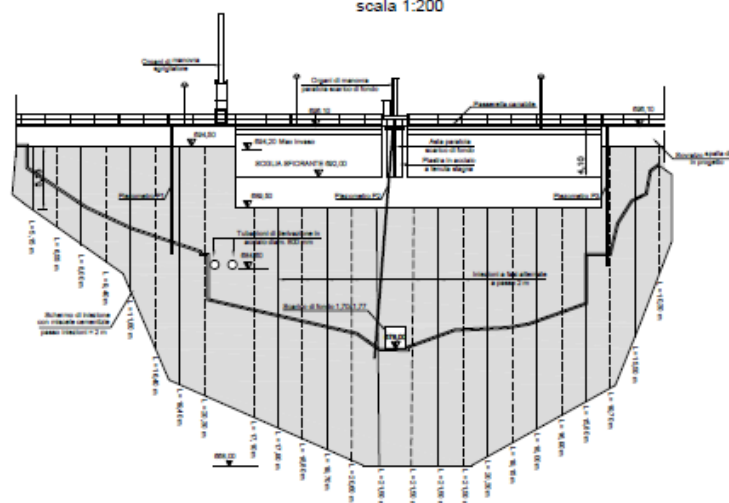
VARIANTE AL PROGETTO AUTORIZZATO

scala 1:200



VARIANTE AL PROGETTO AUTORIZZATO

scala 1:200



- Ampliamento delle luci di sfioro
- Iniezioni in corpo diga

# Variante al progetto autorizzato (2020): principali obiettivi e scelte progettuali

## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento idraulico

### Rivalutazione idrologica 2019

T (anni)	$\phi$ (%)	$Q_{c,T}$ (m <sup>3</sup> /s)
50	0.24	106
100	0.25	120
200	0.25	140
500	0.26	160
1000	0.26	180

$Q_{1000}$  rivalutata + 20% rispetto a  $Q_{1000}$  progetto autorizzato (146 m<sup>3</sup>/s)

### Confronto variante vs stato di progetto

Riepilogo caratteristiche diga	Attuale (FCEM)	Progetto autorizzato	Progetto variante	
Quota coronamento	694,5	696,1	696,1	m s.l.m.
Larghezza coronamento	3,00 <sup>(1)</sup>	2,5	2,5	m
Quota max regolazione = quota soglia di sfioro	693	693	692	m s.l.m.
Quota di max invaso	694,00 <sup>(2)</sup>	694,60 <sup>(3)</sup>	694,20 <sup>(4)</sup>	m s.l.m.
Franco lordo	0,5	1,5	1,9	m
Altezza della diga				
- secondo L. 584/94	18,75	20,35	20,35	m
Quota alveo a valle	675,75	675,75	675,75	m s.l.m.
Quota soglia derivazione	684,6	684,6	684,6	m s.l.m.
Quota minima fondazioni	673	673	673	m s.l.m.
Quota unghia a monte	677	677	677	m s.l.m.
Grado di sismicit�	S = 0	ag = 0.063	ag = 0.063	g

### Portate scarico di superficie

Quota (m slm)	h (m)	$\mu$	L' (m)	Qsfioro (mc/s)	$Q = \mu L' h \sqrt{2gh}$
692.0	0	0.385	26.8	0.0	
692.1	0.1	0.392	26.76	1.5	
692.2	0.2	0.400	26.72	4.2	
692.3	0.3	0.407	26.68	7.9	
692.4	0.4	0.413	26.64	12.3	
692.5	0.5	0.419	26.6	17.5	
692.6	0.6	0.425	26.56	23.3	
692.7	0.7	0.431	26.52	29.7	
692.8	0.8	0.437	26.48	36.6	
692.9	0.9	0.442	26.44	44.2	
693.0	1	0.447	26.4	52.3	
693.1	1.1	0.452	26.36	60.9	
693.2	1.2	0.457	26.32	70.0	
693.3	1.3	0.461	26.28	79.5	
693.4	1.4	0.465	26.24	89.6	
693.5	1.5	0.469	26.2	100.1	
693.6	1.6	0.474	26.16	111.0	
693.7	1.7	0.477	26.12	122.4	
693.8	1.8	0.481	26.08	134.2	
693.9	1.9	0.485	26.04	146.4	
694.0	2	0.488	26	159.0	
694.1	2.1	0.492	25.96	172.0	
694.2	2.2	0.495	25.92	185.4	



**Obiettivo:** scaricare la  $Q_{1000}$  (180 mc/s) con il solo scarico di superficie (sicurezza intrinseca dello sbarramento)

# **Variante al progetto autorizzato (2020): principali obiettivi e scelte progettuali**

## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento idraulico

### Portate progetto autorizzato

Quota di invaso (mslm)	Portate scaricate (m³/s)			
	Sc. fondo	Sc. intermedio	Sc. superficie	Tot. scarichi
<b>694,60</b>	<b>26,5</b>	<b>22,8</b>	<b>102,1</b>	<b>151,4</b>
694,32	26,2	22,4	76,5	125,2
694,20	26,1	22,3	66,3	114,7
694,00	26,0	22,0	50,5	98,4
693,80	25,8	21,7	36,1	83,6
693,60	25,6	21,5	23,4	70,5
693,40	25,4	21,2	12,8	59,4
693,20	25,3	20,9	4,5	50,7
<b>693,00</b>	<b>25,1</b>	<b>20,6</b>	<b>0,0</b>	<b>45,7</b>
692,50	24,6	19,9	0,0	44,5
692,00	24,2	19,1	0,0	43,3
691,50	23,7	18,3	0,0	42,1
691,00	23,3	17,5	0,0	40,8
690,50	22,8	16,6	0,0	39,4
690,00	22,3	15,7	0,0	38,0
689,50	21,8	14,7	0,0	36,5
689,00	21,3	13,7	0,0	35,0
688,50	20,7	12,5	0,0	33,3
688,00	20,2	11,3	0,0	31,5
687,50	19,7	9,9	0,0	29,6
687,00	19,1	8,3	0,0	27,3
686,50	18,5	6,2	0,0	24,7
686,00	17,9	3,0	0,0	20,9
685,50	17,3	0,0	0,0	17,3
685,00	16,6	0,0	0,0	16,6

### Portate variante al progetto autorizzato

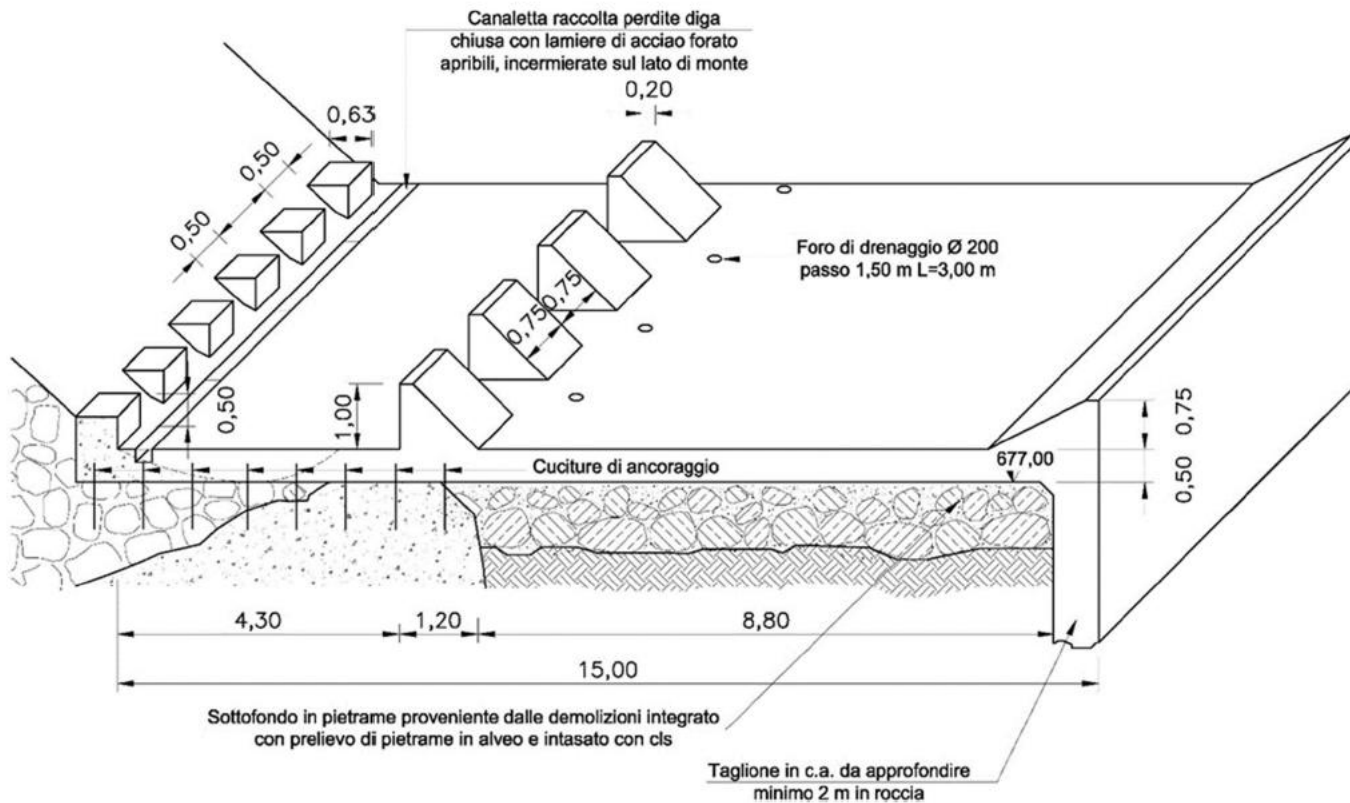
Quota (m slm)	Qsfioro (mc/s)	Qmf (mc/s)	Qtotale (mc/s)
692.0	0.0	19.1	19.1
692.1	1.5	19.3	20.7
692.2	4.2	19.4	23.7
692.3	7.9	19.6	27.5
692.4	12.3	19.7	32.1
692.5	17.5	19.9	37.3
692.6	23.3	20.0	43.3
692.7	29.7	20.2	49.8
692.8	36.6	20.3	57.0
692.9	44.2	20.5	64.7
693.0	52.3	20.6	72.9
693.1	60.9	20.8	81.6
693.2	70.0	20.9	90.9
693.3	79.5	21.0	100.6
693.4	89.6	21.2	110.8
693.5	100.1	21.3	121.4
693.6	111.0	21.5	132.5
693.7	122.4	21.6	144.0
693.8	134.2	21.7	156.0
693.9	146.4	21.9	168.3
694.0	159.0	22.0	181.0
694.1	172.0	22.1	194.2
694.2	185.4	22.3	207.7

Nota: nella variante lo scarico di fondo non viene computato ai fini della sicurezza idraulica



## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento idraulico

### Dimensionamento della vasca di dissipazione



Vasca dimensionata secondo i criteri USBR, per vasche di tipologia III con denti di dissipazione:

$$E = H_0 = 16.7 \text{ m}$$

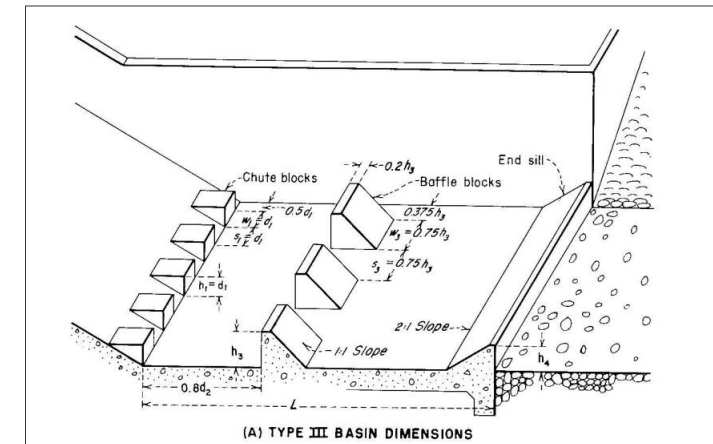
$$V_1 = \sqrt{2gH_0} = 18 \text{ m/s}$$

$$D_1 = \frac{Q}{BV_1} = 0.49 \text{ m}$$

$$F_1 = \frac{V_1}{\sqrt{gD_1}} = 8.3$$

$$D_2 = \frac{1}{2} D_1 \left( \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) = 5.5 \text{ m}$$

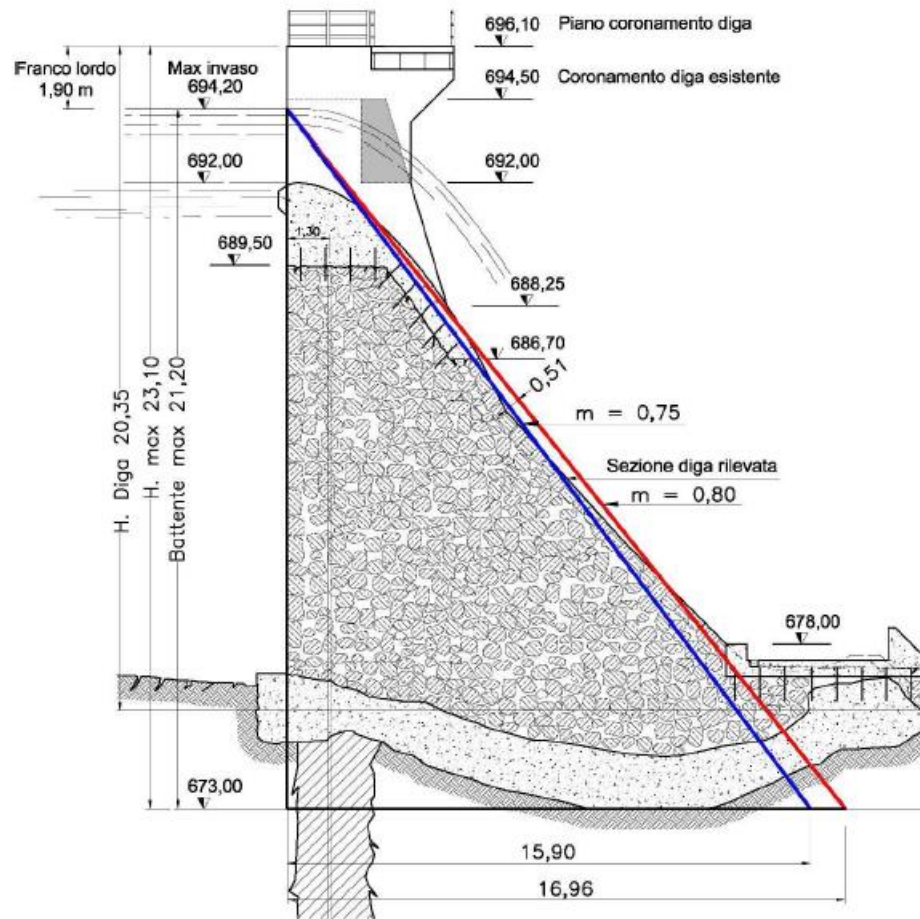
$$L = 2.7 \cdot D_2 = 14.8 \text{ m}$$



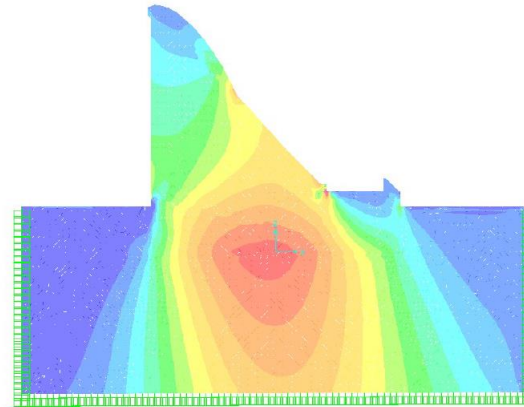


## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento strutturale

### Sezione di Variante: triangolo fondamentale



### Risultati delle verifiche di sicurezza a scorrimento



#### Combinazione eccezionale massima piena

Verifica di stabilità allo scorrimento Quota 673 m s.l.m.			
c	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	mq	17.0
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4660.969
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2516.51
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2620.511
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.11

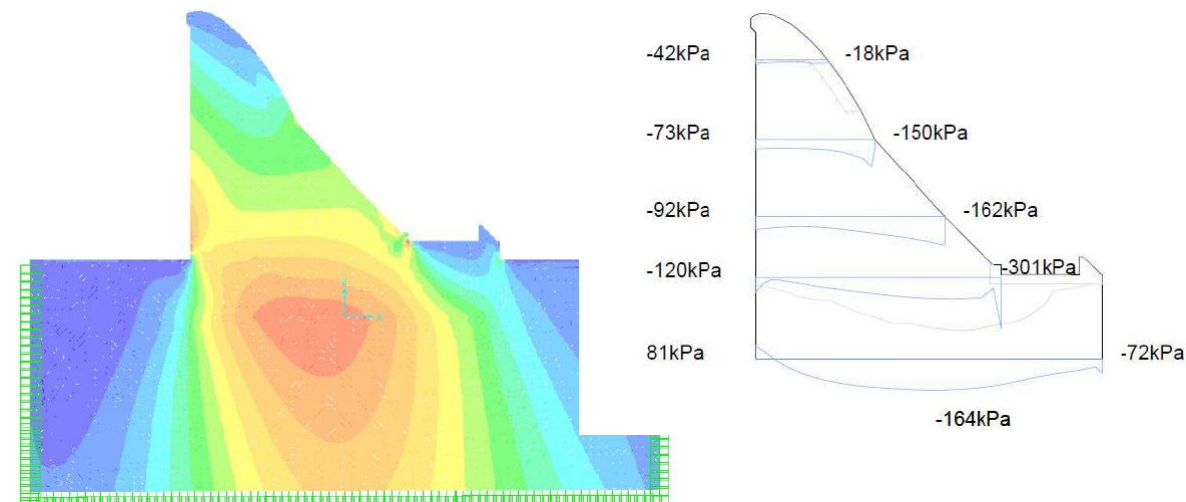
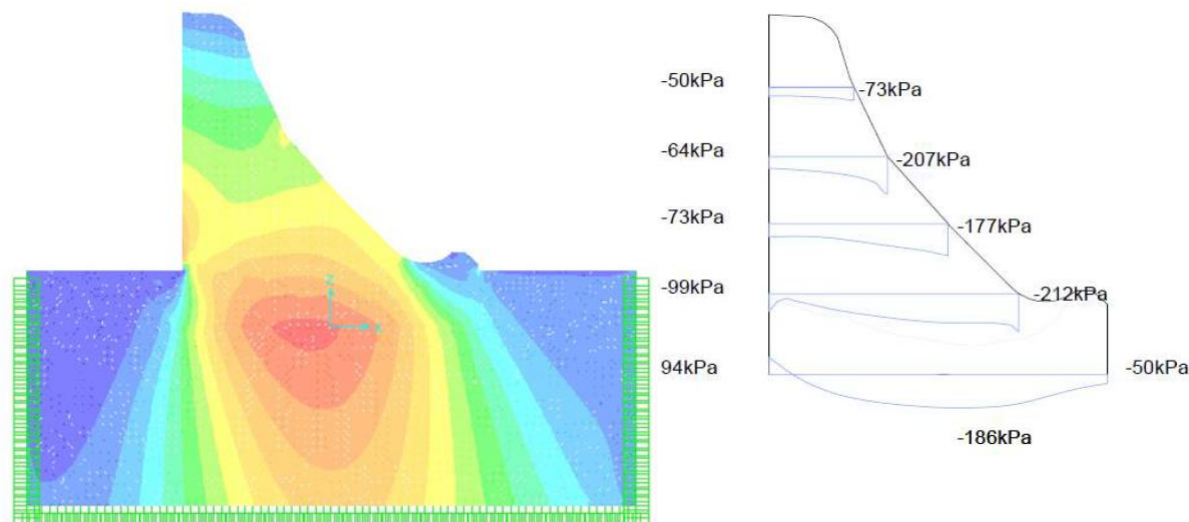
#### Combinazione sismica SLC

Verifica di stabilità allo scorrimento Quota 673 m s.l.m.			
c	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	mq	17.0
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4627.169
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2214.24
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2721.045
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.14

Vengono mantenuti gli stessi parametri di resistenza all'interfaccia diga-roccia utilizzati nel progetto 2018:  $\phi = 45^\circ$  e  $c' = 200$  kPa

## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento strutturale

Confronto risultati verifiche sicurezza stato attuale vs variante progettuale: combinazione di esercizio



Combinazione di esercizio stato attuale

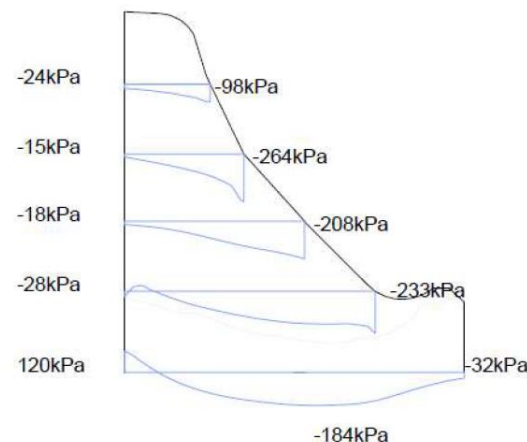
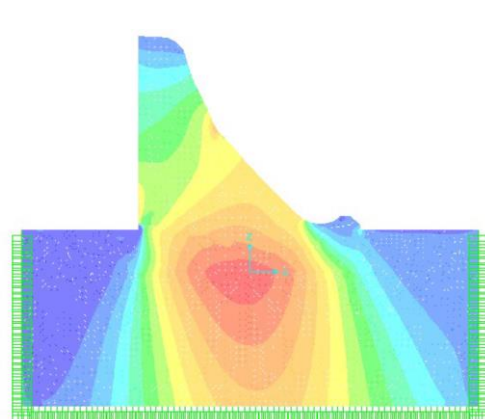
Verifica di stabilità allo scorrimento			
c	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	m <sup>2</sup>	17.9
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4765.788
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2141.63
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2509.648
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.47

Combinazione di esercizio variante

Verifica di stabilità allo scorrimento			
c	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	m <sup>2</sup>	18.2
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4652.714
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2214.24
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2257.074
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.69

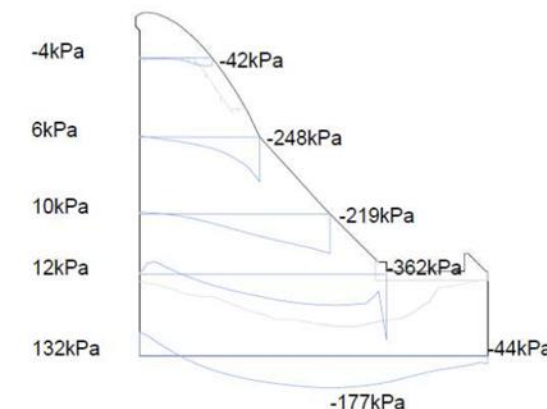
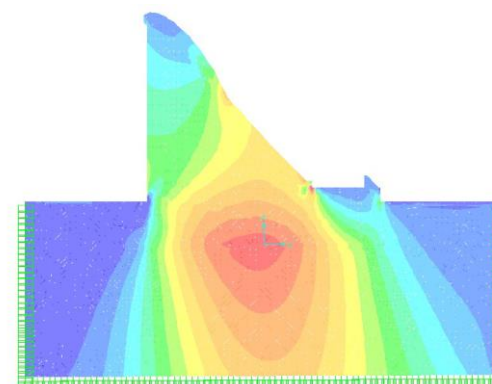
## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento strutturale

Confronto risultati verifiche sicurezza stato attuale vs variante progettuale: combinazione massima piena



Combinazione massima piena stato attuale  
( $q_{\max \text{ inv}} = 694,00 \text{ m s.l.m.}$ , esitata  $\approx Q_{50} = 106 \text{ mc/s}$ )

Verifica di stabilità allo scorrimento			
C	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	m <sup>2</sup>	17.4
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4769.17
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2449.76
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2623.08
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.21



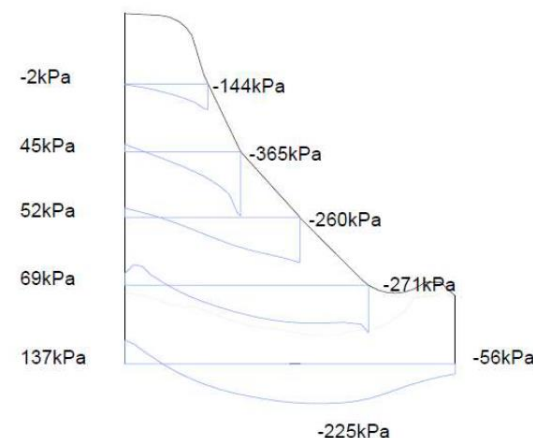
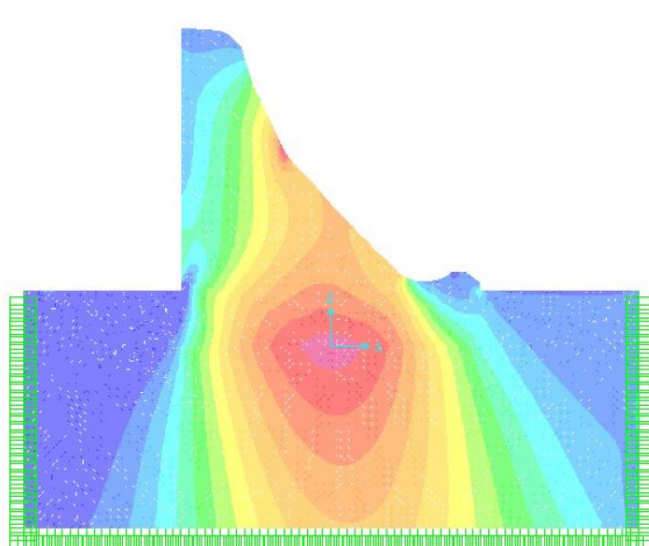
Combinazione massima piena variante  
( $q_{\max \text{ inv}} = 694,20 \text{ m s.l.m.}$ , esitata  $Q_{1000} = 180 \text{ mc/s}$ )

Verifica di stabilità allo scorrimento Quota 673 m s.l.m.			
C	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	m <sup>2</sup>	17.0
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4660.969
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2516.51
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2620.511
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.11



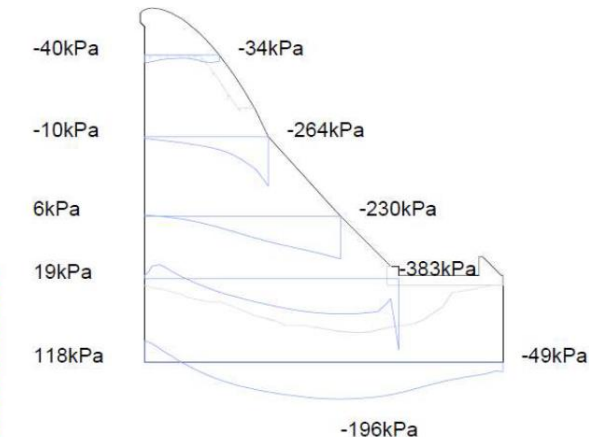
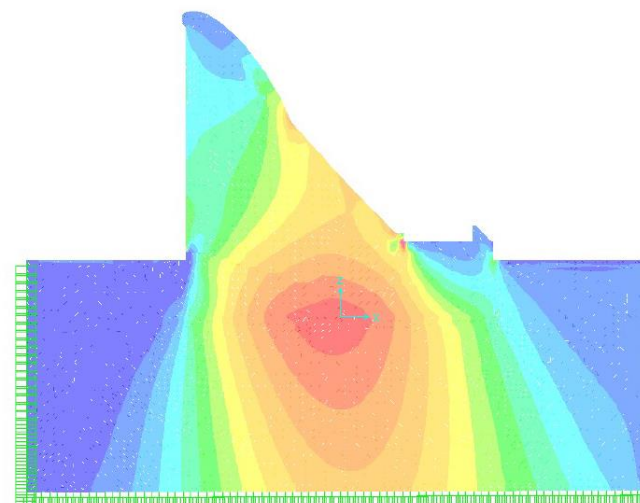
## Variante al progetto autorizzato (2020): il miglioramento strutturale

Confronto risultati verifiche sicurezza stato attuale vs variante progettuale: combinazione sismica SLC



Combinazione sismica SLC stato attuale

Verifica di stabilità allo scorrimento			
C	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	mq	17.0
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4735.955
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2141.63
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2988.378
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.01

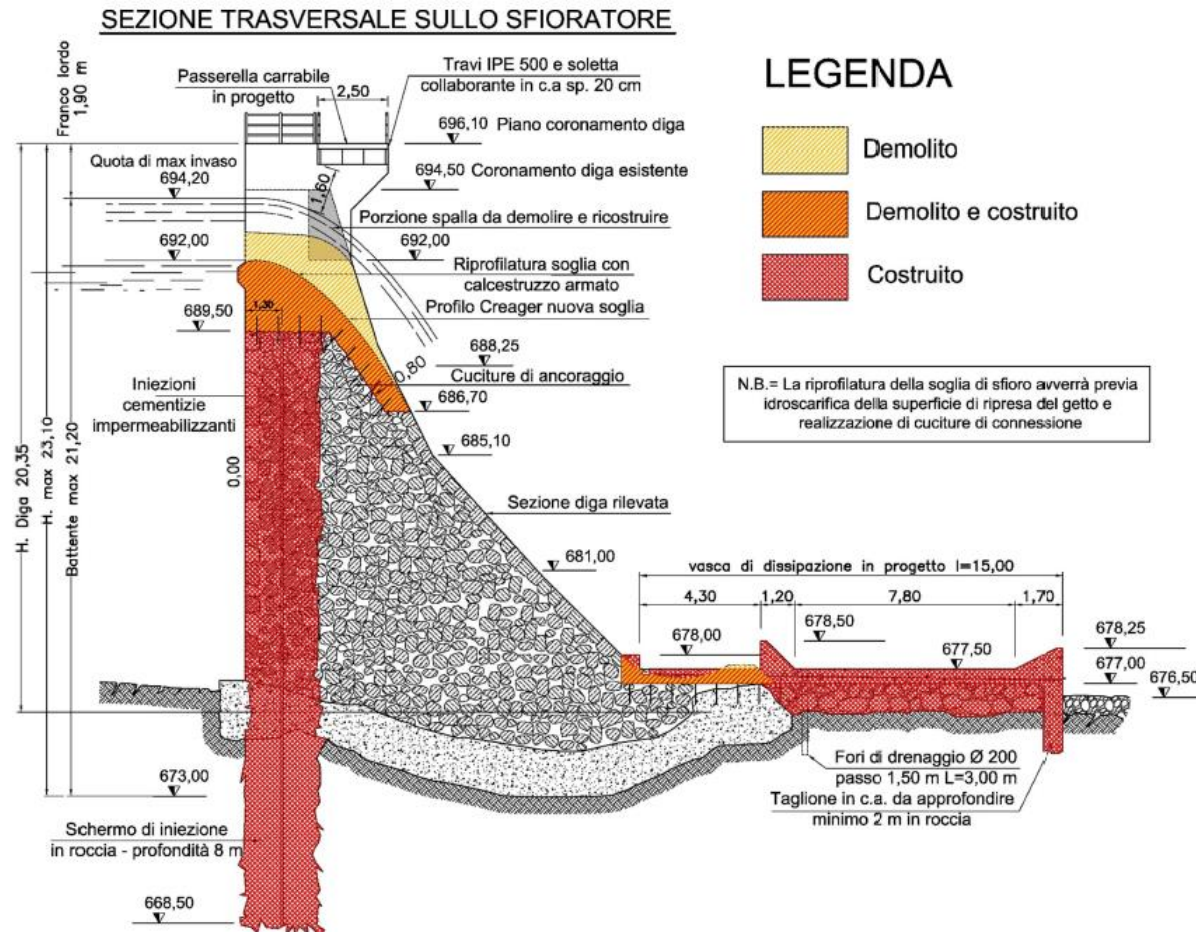


Combinazione sismica SLC variante

Verifica di stabilità allo scorrimento Quota 673 m s.l.m.			
C	coesione	KPa	200
A	area superficie di verifica	mq	17.0
$\sum N$	somma forze normali alla superficie	kN	4627.169
$\sum U$	somma delle sottopressioni	kN	2214.24
$\Phi$	angolo di attrito lungo superficie di verifica	°	45
		rad	0.79
$\tan \Phi$	tangente angolo di attrito		1
$\sum T$	somma forza di taglio	kN	2721.045
Fs	fattore di sicurezza allo scorrimento		2.14

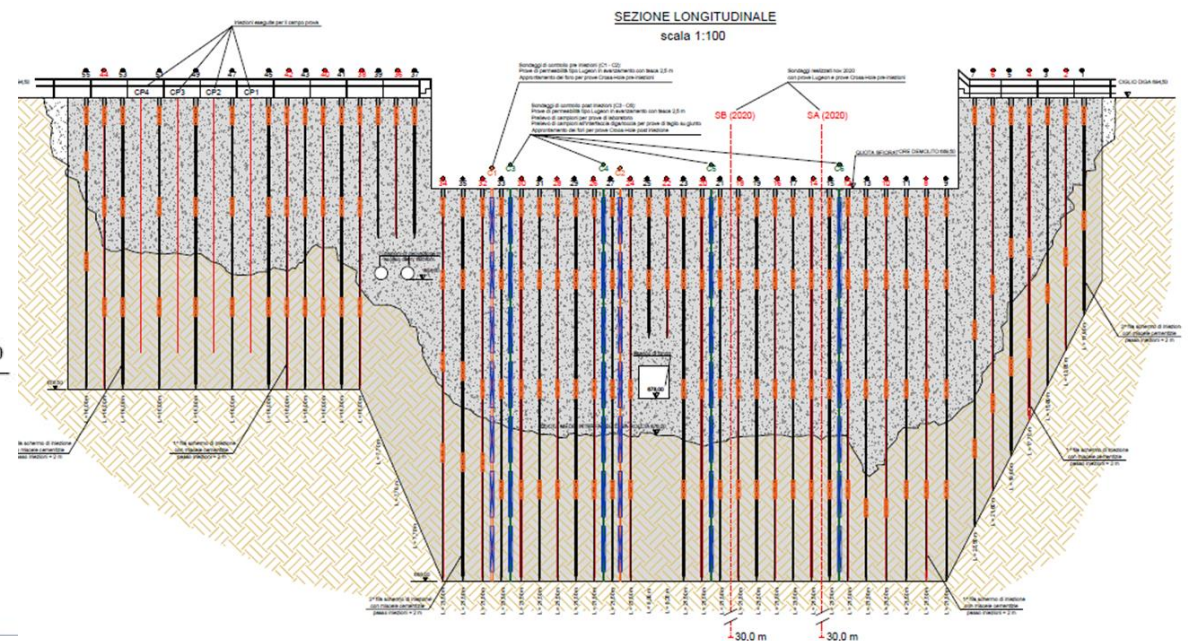
## Variente al progetto autorizzato (2020): il miglioramento strutturale

Campagna di iniezioni in corpo diga e nella roccia di fondazione



### OBIETTIVI:

- MIGLIORAMENTO STRUTTURALE MURATURA (CONSOLIDAMENTO: AUMENTO VELOCITA' ONDE SISMICHE VP-VS)**
- IMPERMEABILIZZAZIONE LATO MONTE MURATURA E ROCCIA FONDAZIONE (DIMINUZIONE PERMEABILITA' K)**



### Variente al progetto (2020): iter autorizzativo

#### Progetto definitivo di Variante (progetto Enel-D&CIS Milano – Ing. Figini)

- Presentato da Enel il 21/04/2020
- Autorizzato da DGD il 06/08/2020 (prescrizione: abbassamento urgente della soglia sfiorante)
- Decreto AU 13836 di Regione Lombardia del 13/11/2020

#### Progetto esecutivo di Variante (progetto Enel-D&CIS Milano – Ing. Figini)

##### Primo stralcio (tagli e demolizioni per abbassamento soglia sfiorante):

- Presentato da Enel il 13/11/2020
- Autorizzato da DGD il 23/11/2020

##### Secondo stralcio (messa in sicurezza corpo diga e nuovo coronamento):

- Presentato da Enel il 15/02/2021
- Autorizzato da DGD il 29/04/2021

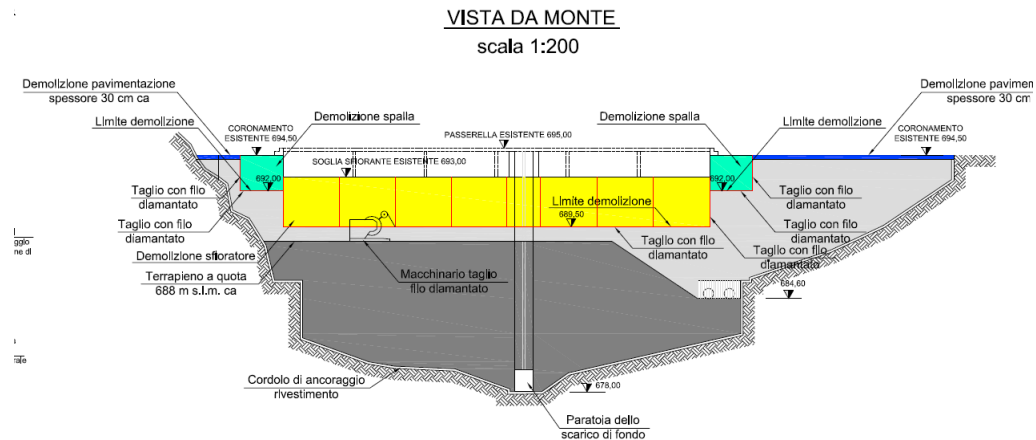
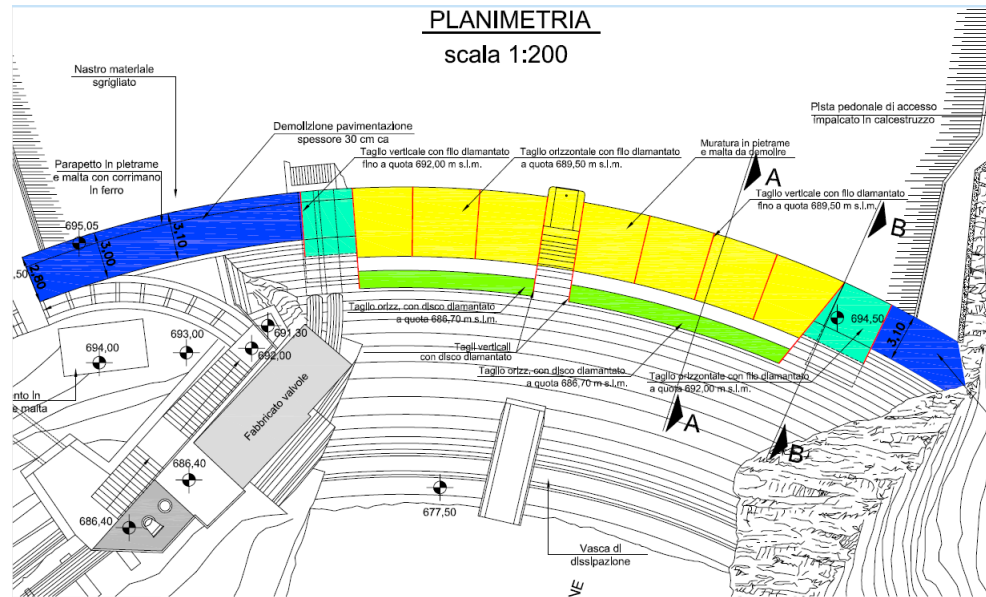
##### Terzo stralcio (vasca dissipazione e altre opere accessorie e complementari):

- Presentato da Enel il 11/02/2022
- Autorizzato da UTD-Mi il 18/03/2022

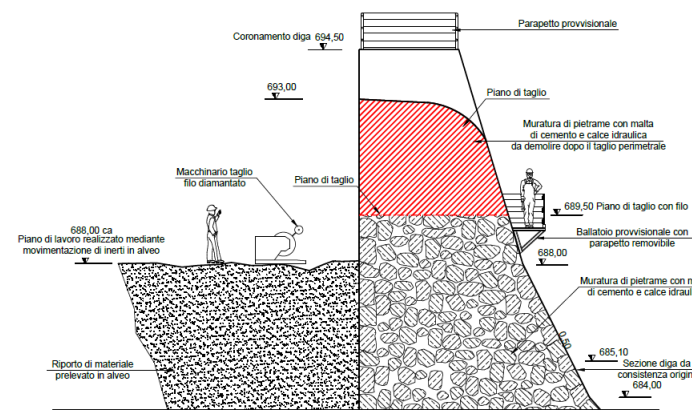


## Progetto esecutivo di Variante

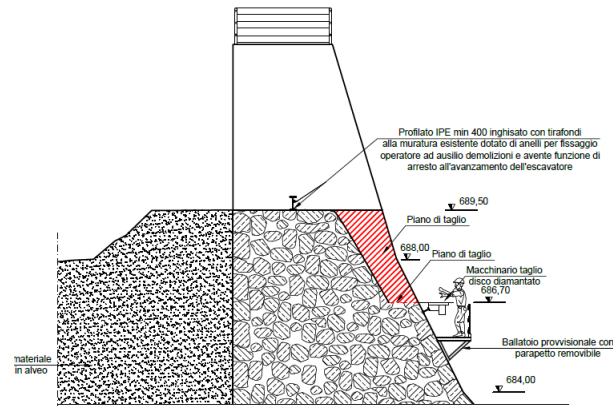
### Primo stralcio (tagli e demolizioni per abbassamento soglia sfiorante)



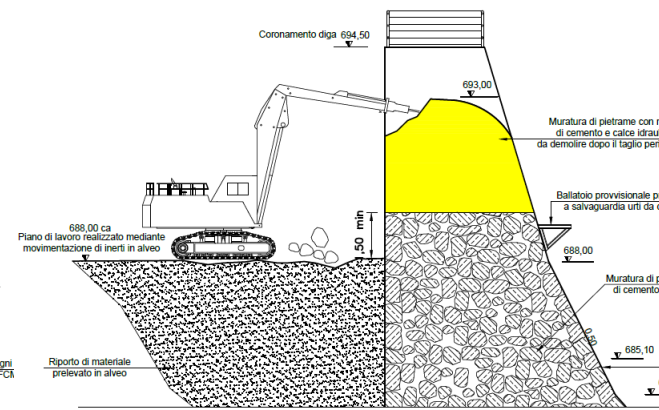
FASE 1 - Realizzazione fori orizzontali per passaggio filo diamantato - esecuzione tagli orizzontali e verticali con filo diamantato per demolizione sfioratore fino a quota 689,50 m s.l.m.



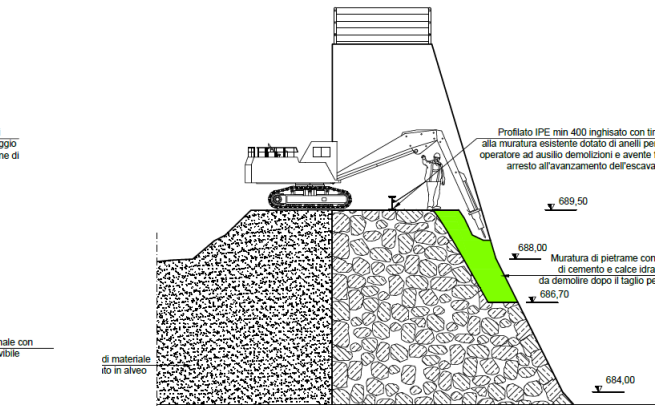
FASE 5 - Esecuzione tagli orizzontali e verticali con disco diamantato per demolizione sfioratore fino a quota 686,70 m s.l.m.



FASE 2 - Demolizione sfioratore fino a quota 689,50 m s.l.m. con martellone montato su escavatore - recupero del materiale demolito e trasporto a discarica



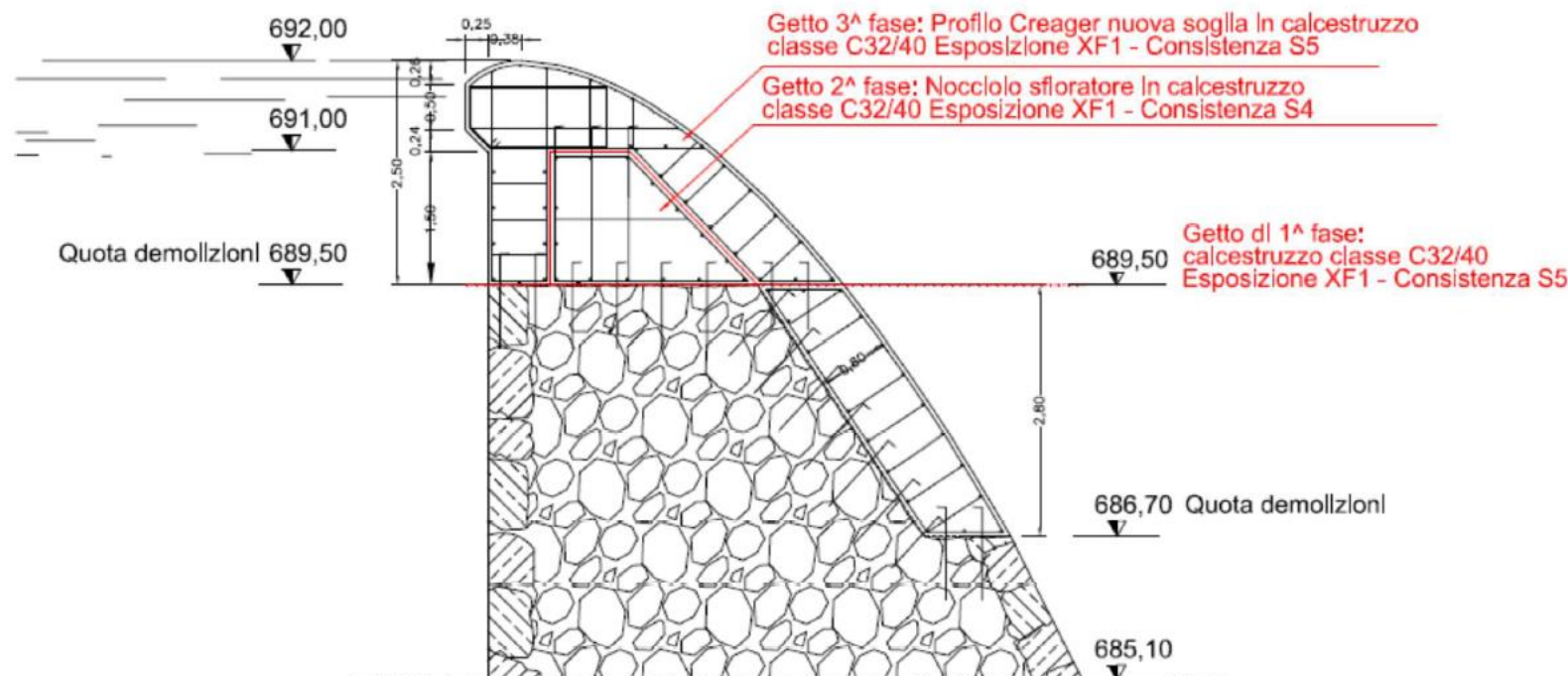
FASE 6 - Demolizione sfioratore fino a quota 686,70 m s.l.m. con martellone montato su escavatore - recupero del materiale demolito e trasporto a discarica



### Progetto esecutivo di Variante

Secondo stralcio (messa in sicurezza corpo diga e nuovo coronamento)

#### Fasi di getto per il nuovo sfioratore



Suddivisione delle fasi di getto scelta in modo da minimizzare la volumetria del singolo getto ed il numero delle riprese orizzontali e verticali tra i getti



Unica ripresa orizzontale a quota 689.50

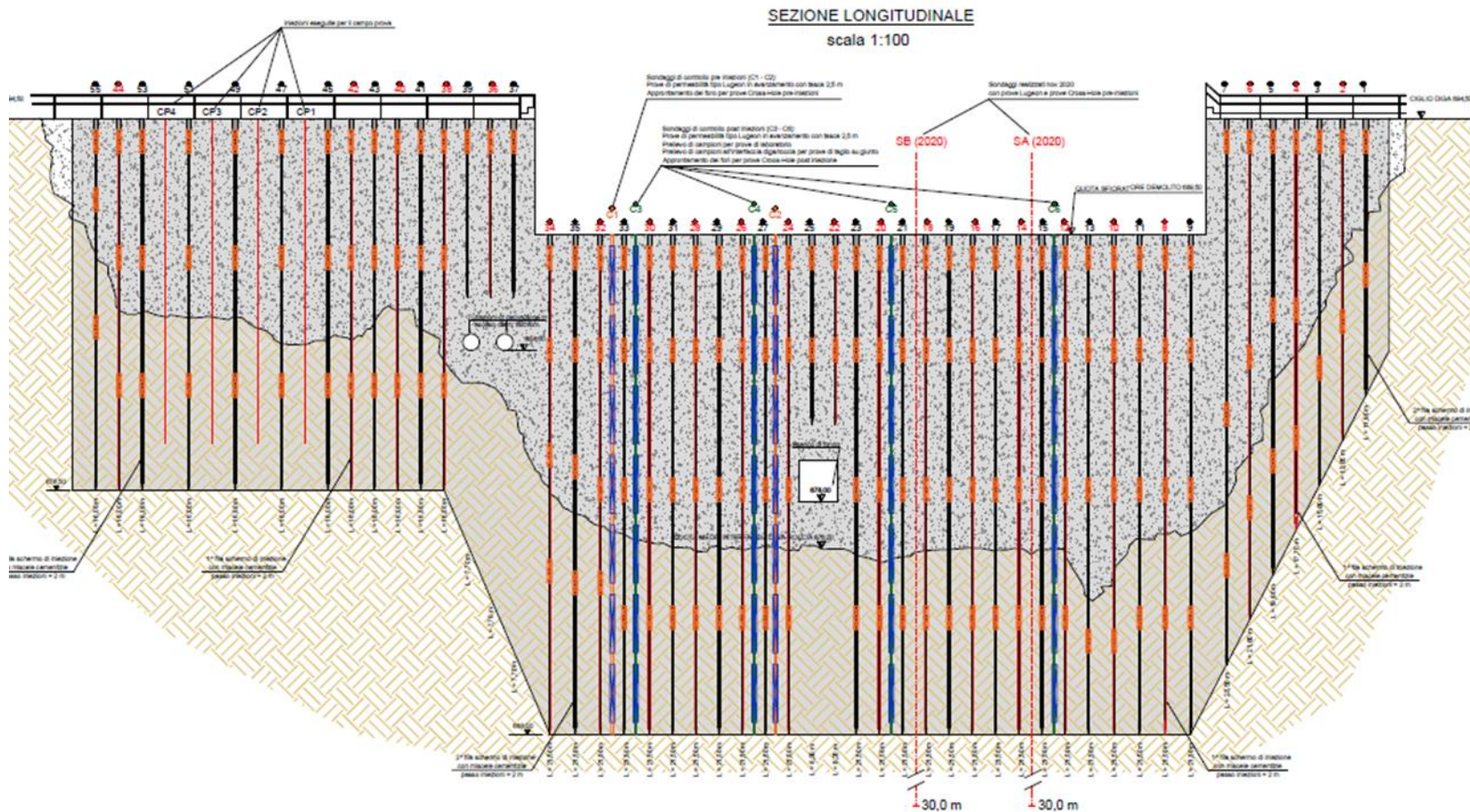
Cuciture ancoraggio alla muratura esistente: barre di ancoraggio  $\phi 20$  in acciaio B450C, 2 chiodi/m<sup>2</sup>, profondità ancoraggio 70 cm



# Progetto esecutivo di Variante

## Secondo stralcio (messa in sicurezza corpo diga e nuovo coronamento)

## Iniezioni in corpo diga e nella roccia di fondazione



Eseguite dalla soglia sfiorante  
abbassata (689.50 m slm) e dalle spalle

Profondità in roccia fino a 8 m

Passo e geometria fori e i parametri di iniezione (pressioni, volumi, energia, miscela) vengono definiti da campo prove eseguito in spalla dx





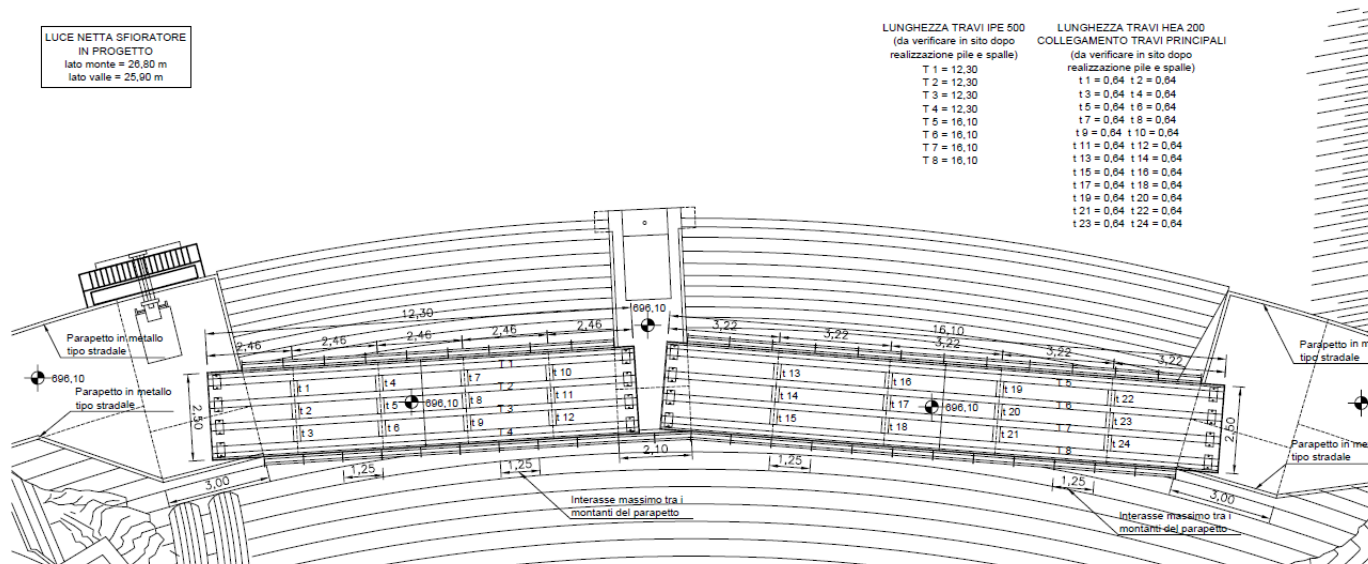
## Progetto esecutivo di Variante

### Secondo stralcio (messa in sicurezza corpo diga e nuovo coronamento)

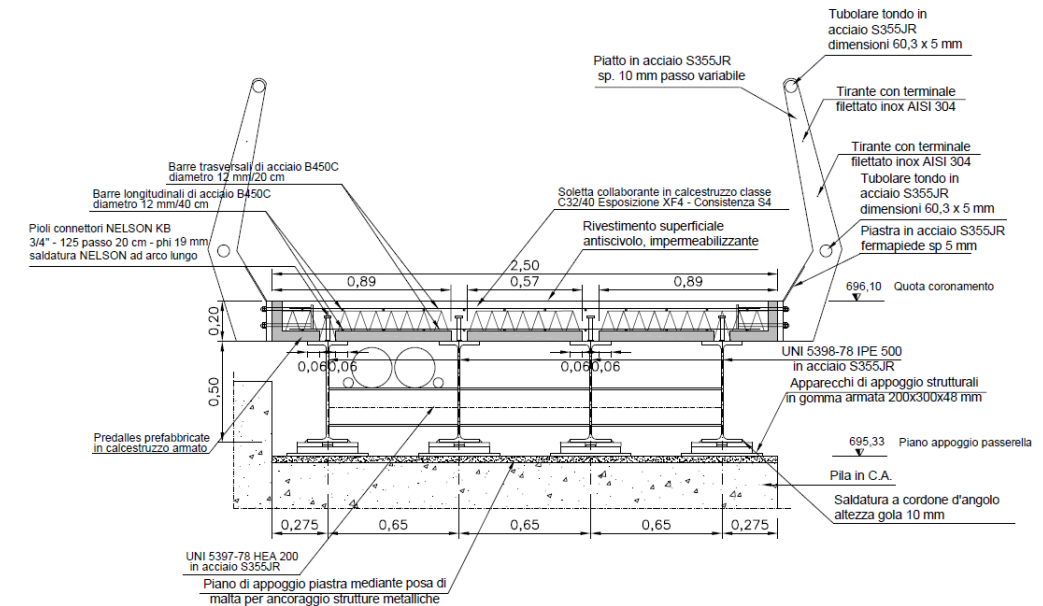
#### Impalcato passerella pedonale di coronamento:

- Struttura mista acciaio-calcestruzzo (travi acciaio IPE500 + soletta collaborante in cls s = 20 cm)
- Pioli di collegamento di tipo Nelson per realizzare la collaborazione acciaio - calcestruzzo
- Soletta realizzata con predalle prefabbricate s = 5 cm + getto di completamento s = 15 cm
- Travi di collegamento HEA200 per evitare instabilità flessione-torsionale in fase di getto
- Apparecchi di appoggio in gomma armata

Planimetria



Sezione trasversale

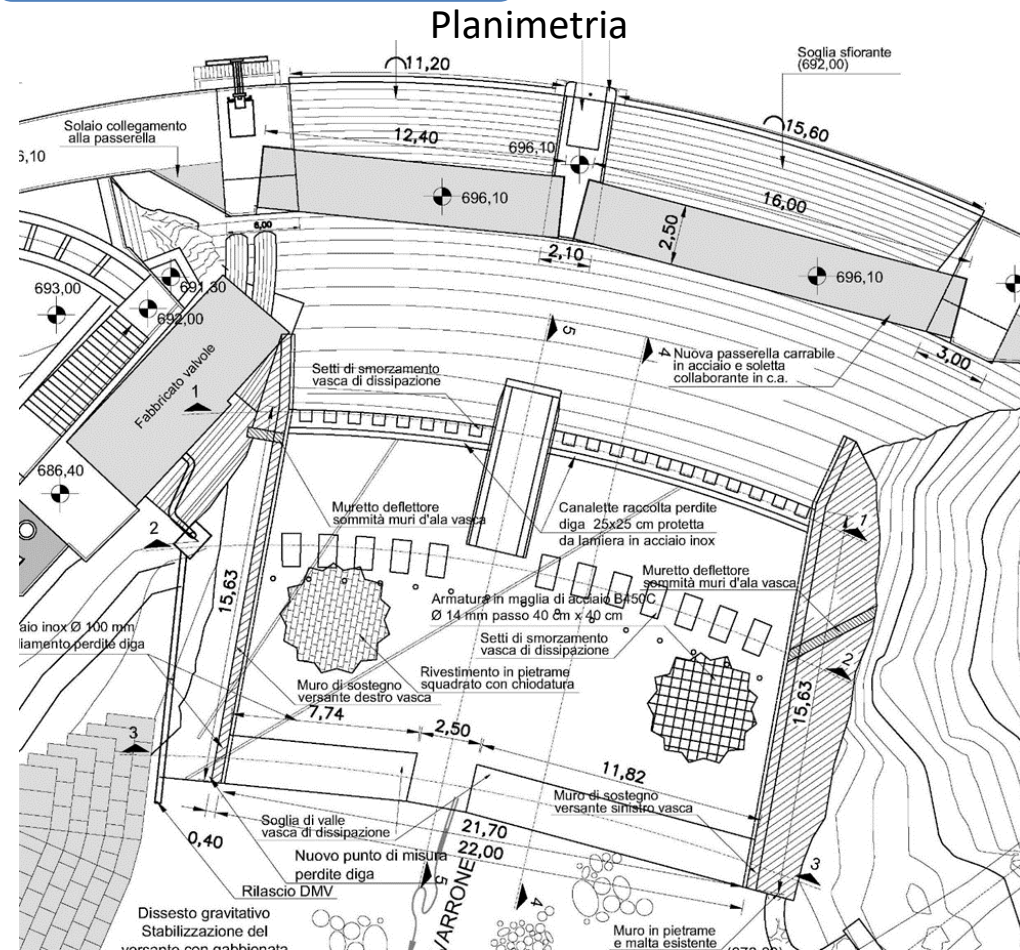




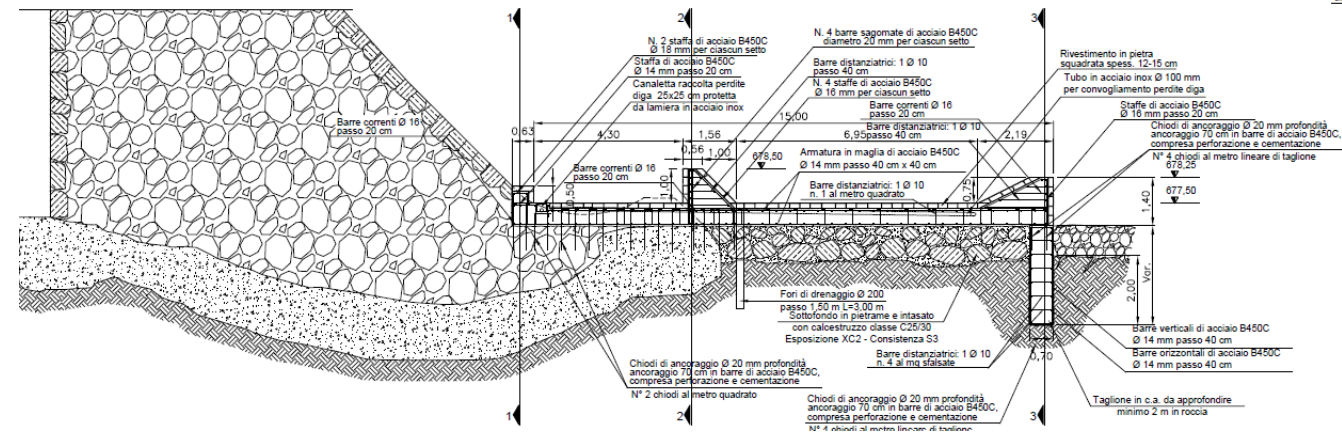
## Progetto esecutivo di Variante

Terzo stralcio (vasca di dissipazione e altre opere accessorie)

### Vasca di dissipazione



### Sezione trasversale monte-valle



### Sezione longitudinale in corrispondenza dei denti di dissipazione

