

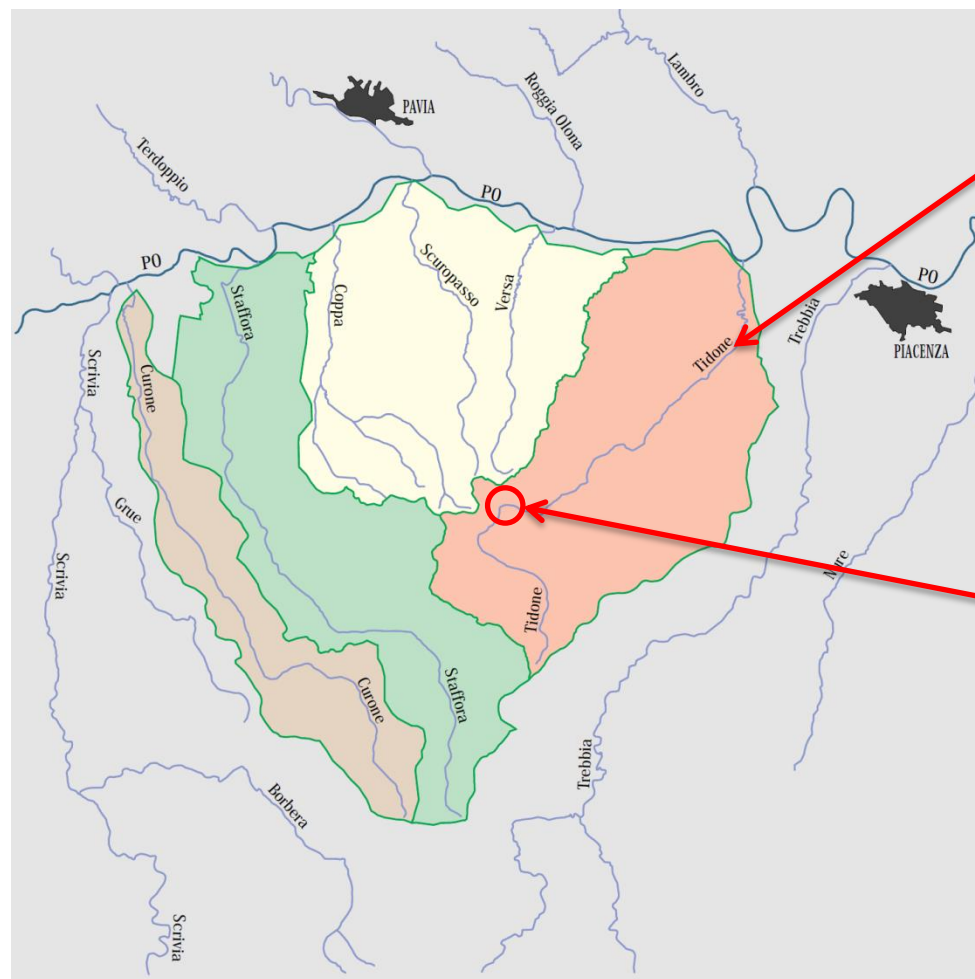
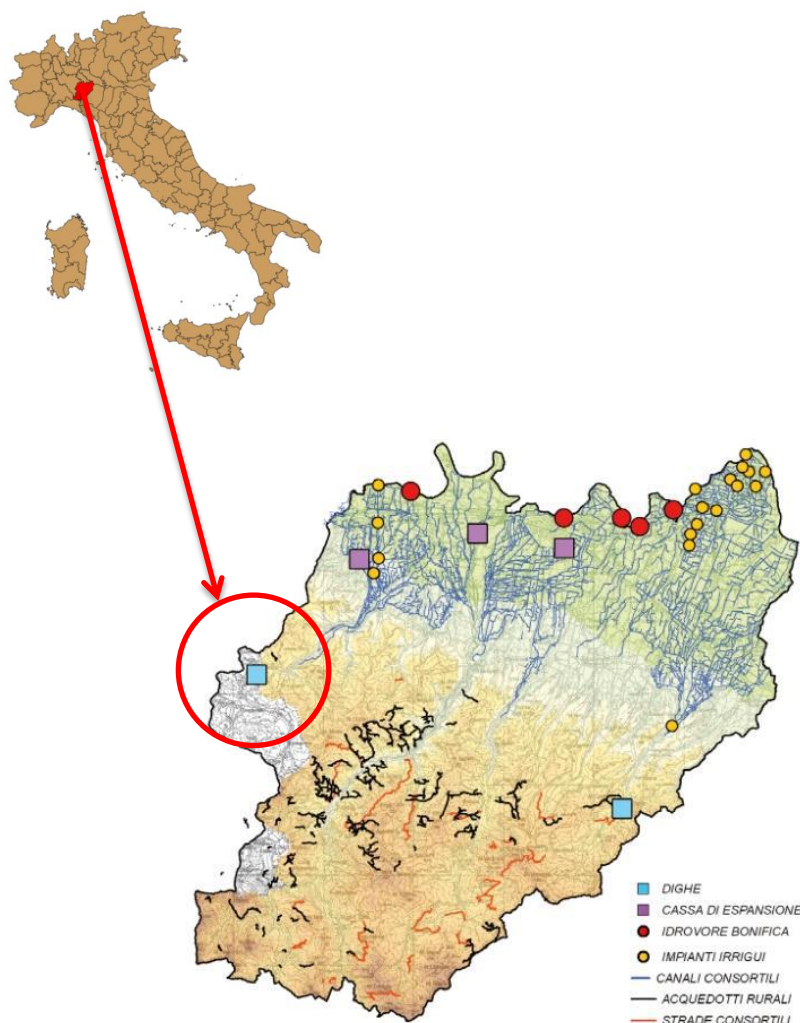
# Giornata di studio ITCOLD: MANUTENZIONI GRANDI DIGHE



*Diga del Molato:  
adeguamento strutturale ed idraulico*

*Ing. Marco Belicchi*

MAJONE&PARTNERS  
ENGINEERING



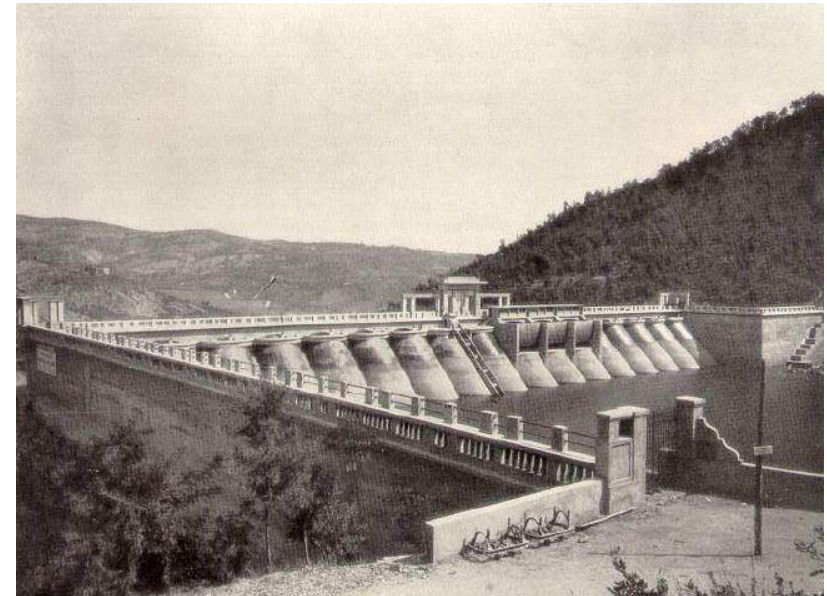
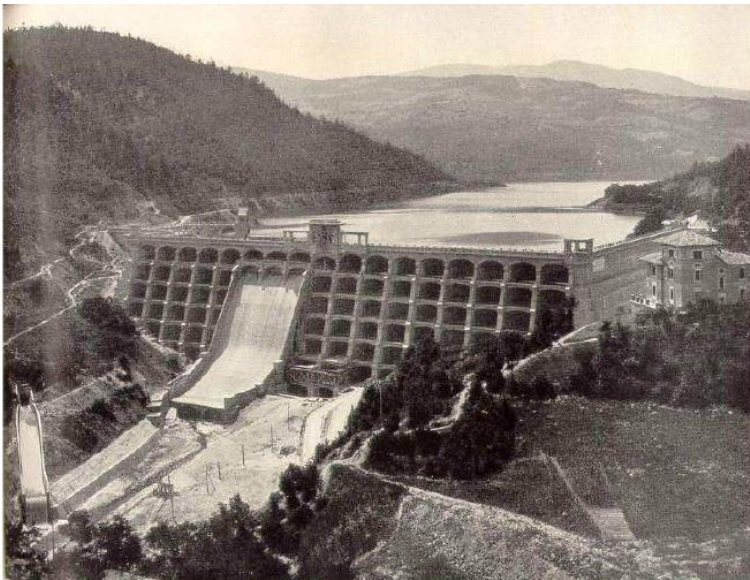
**Torrente Tidone**  
 $S_{\text{bacino}} = 480 \text{ km}^2$

**Diga di Molato**  
 $S_{\text{sottesa}} = 83 \text{ km}^2$

Diga a **contrafforti** e **voltine**, costruita nel 1921 - 1928

D.M. 24 Marzo 1982: A.c - Dighe murarie: a volte o solette, sostenute da contrafforti

D.M. 26 Giugno 2014: a.1 Diga di calcestruzzo a gravità: a.1.1 (ordinaria, spalle) + a.1.2 (alleggerita, corpo centrale)



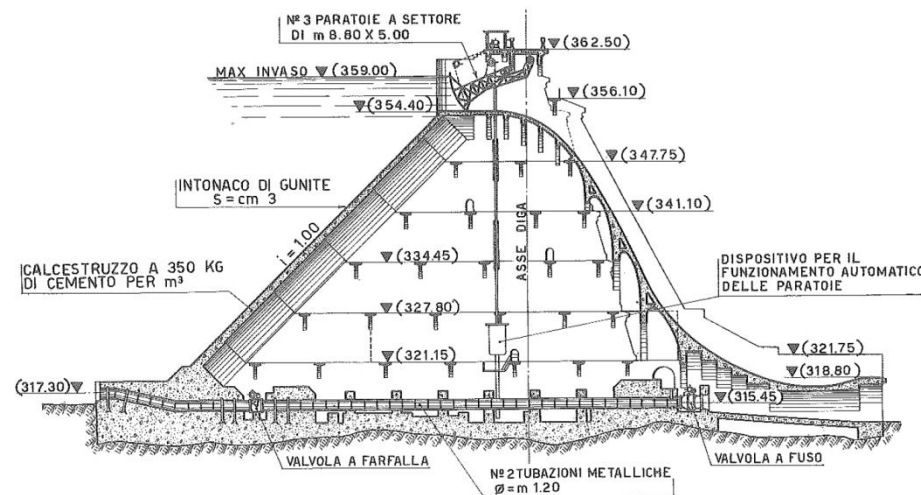
**Singularità:** contrafforti e voltine in c.a. solo nella parte centrale, le due parti laterali sono a gravità massiccia in calcestruzzo, con asse planimetrico ortogonale al corpo centrale.





## Principali caratteristiche dello sbarramento

- Concessionario: *Consorzio di Bonifica di Piacenza*
- Diga a volte e contrafforti in calcestruzzo armato, con due parti laterali a gravità massiccia in calcestruzzo con  $V_{cls}=114'950 \text{ m}^3$
- altezza massima (L. 584/94): 52,60 m
- sviluppo del coronamento, con spalle a gravità: 335 m
- quota coronamento (ponte e spalle a gravità): 362,50 m s.l.m.
- quota max. regolazione: 354,40 m s.l.m.
- quota max. invaso: 358,30 m s.l.m.
- volume totale di invaso: 11,50 Mmc



## QUOTE ESERCIZIO SPERIMENTALE

### Periodo non irriguo (settembre-febbraio)

- max. regolazione 351,50 m s.l.m.
- max. reg. eventi di piena 352,50 m s.l.m.

### Periodo irriguo (marzo-agosto)

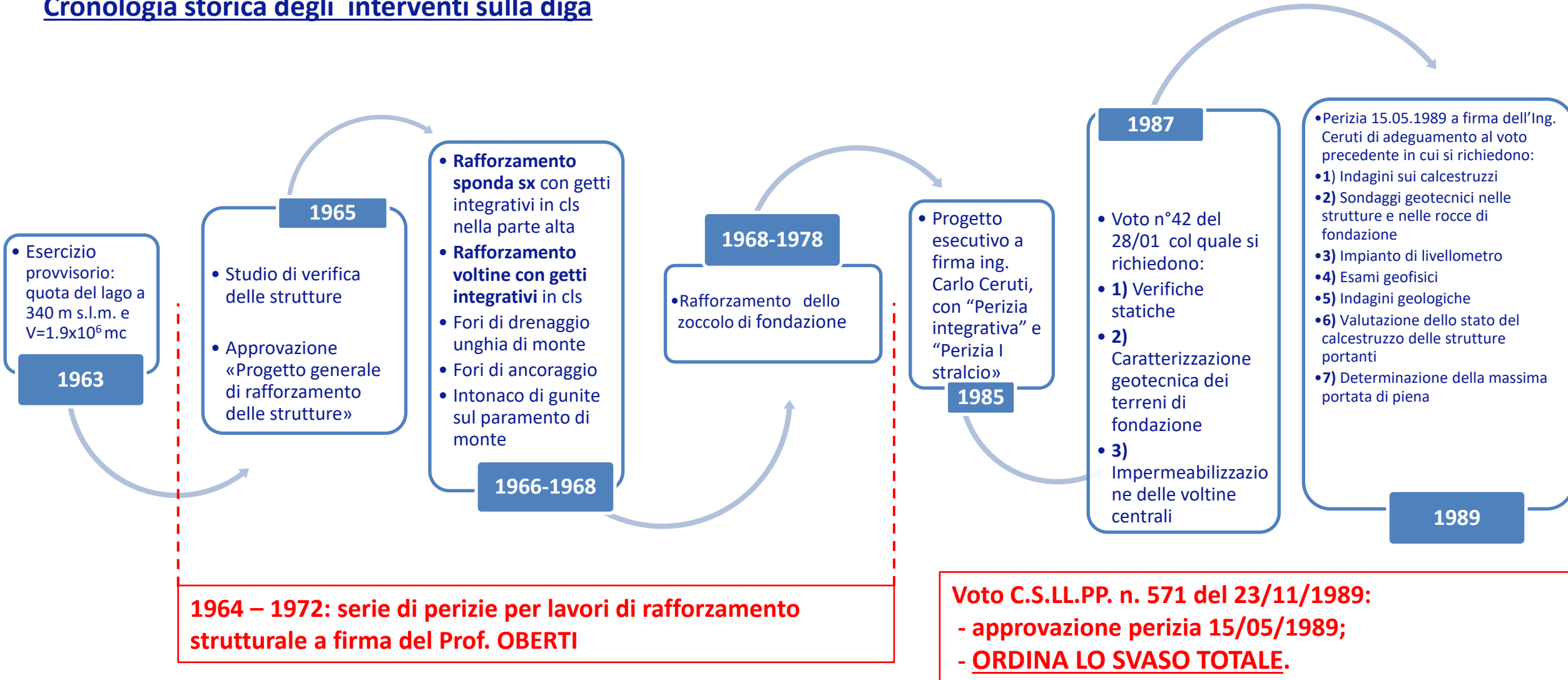
- max. regolazione : 353,70 m s.l.m.
- max. reg. eventi di piena: 354,40 m s.l.m.



## Portate massime organi di scarico (W.L. al massimo invaso):

- Scarico di superficie in corpo diga: 350 m<sup>3</sup>/s
- Scarico di superficie ausiliario: 375 m<sup>3</sup>/s
- Scarico di mezzo-fondo: 42 m<sup>3</sup>/s
- Scarico di fondo: 38 m<sup>3</sup>/s

## Cronologia storica degli interventi sulla diga





## Aspetti oggetto di approfondimento, studio e progettazione

- 1) Capacità di scarico inferiore a quella di riferimento  $T=1000$  anni
- 2) Comportamento strutturale
  - scorrimento
  - sisma
- 3) Degrado del calcestruzzo (voltine e speroni)
- 4) Organi di intercettazione degli scarichi profondi
- 5) Strumenti di misura e controllo della diga

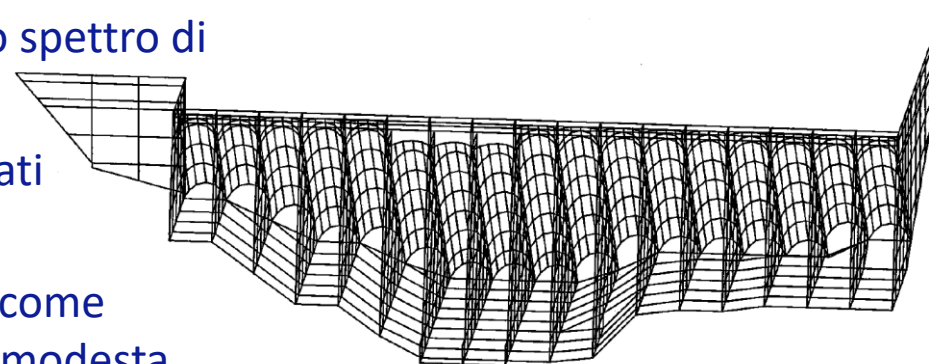
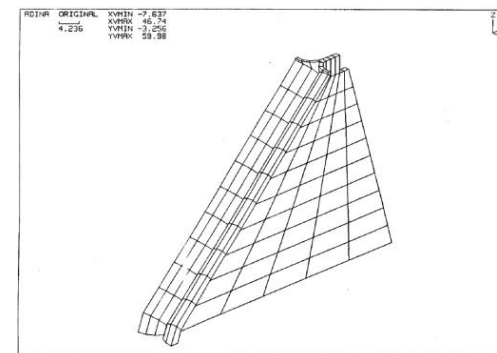


Tali aspetti hanno reso necessaria una serie di interventi di ristrutturazione e migliorie su corpo diga ed opere accessorie

## Stato di consistenza, condizioni statiche, comportamento sismico (marzo 1990):

### MODELLI NUMERICI AGLI ELEMENTI FINITI

- Preceduti da estese indagini in situ su calcestruzzi e roccia di fondazione
- Studio dell'interazione bacino-struttura-roccia di fondazione e degli effetti inerziali e di smorzamento dell'acqua invasata (26 marzo 1990)
  - Sisma III categoria ( $S=6$ ,  $C=0.04$ ,  $a=0.4g$  sia in orizzontale che verticale)
  - Analisi modale 2D + analisi 3D (sperone + 2 mezze voltine) per raffronto con la soluzione analitica alla Westergaard (1933)
- Studio della statica e della dinamica sismica della struttura (6 marzo 1990)
  - Modello 3D ad elementi «piastra» e «trave», analisi statica e dinamica ( $S=6$ , spettro normativa);
  - Analisi sismica condotta separatamente nelle 3 direzioni, con lo spettro di normativa
  - **Modello 1: perfetta integrità manufatto**, «sbadacchi» considerati perfettamente incastrati agli speroni
  - **Modello 2: «sbadacchi» considerati «lesionati»**, schematizzati come «bielle» in grado di trasmettere solo sforzi assiali, con rigidità modesta





## Lavori di manutenzione della diga di MOLATO a partire dagli anni '90:

### II PROGETTO GENERALE DI RISTRUTTURAZIONE (ing. Aldo Marcello, giu. 1993 – nov. 1994):

il tema di fondo era la  
**CONDIZIONE DI STABILITA'**  
**DELLA DIGA**, anche in presenza  
di **sisma**, in funzione di:

- geometria delle strutture;
- materiali impiegati nella costruzione;
- condizioni di invaso.



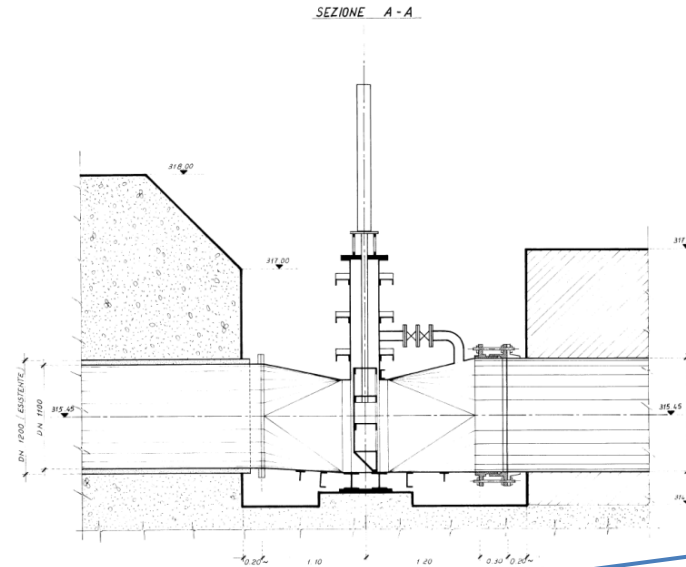
### (1° STRALCIO)

- Indagini preventive per la definizione operativa delle tecniche di consolidamento;
- Consolidamento degli speroni nn. 9-10-11-12 con iniezioni (a base di microcemento), tipo "C" (subcorticali, non armate), tipo "A" e tipo "B" (entrambe armate con barra FeB 22k);
- Indagini di controllo dei risultati conseguiti;
- Impermeabilizzazione delle voltine comprese tra gli speroni 14-15 e 15-16 con elastomerico additivato con polvere di alluminio;
- Esecuzione di alcuni saggi nella galleria di mezzofondo;

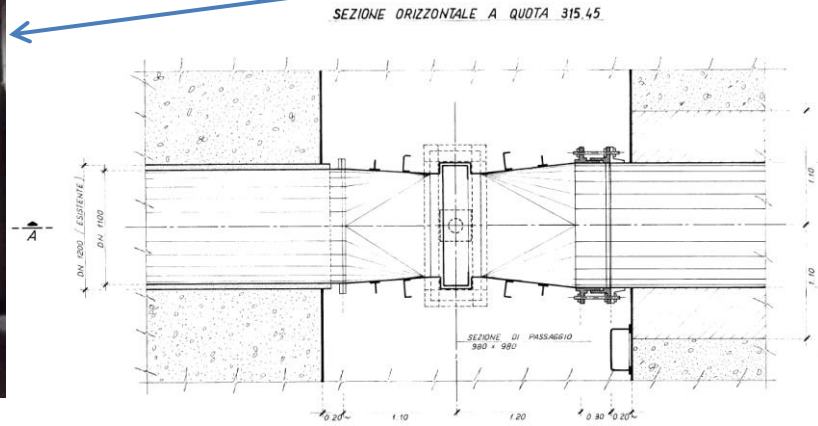
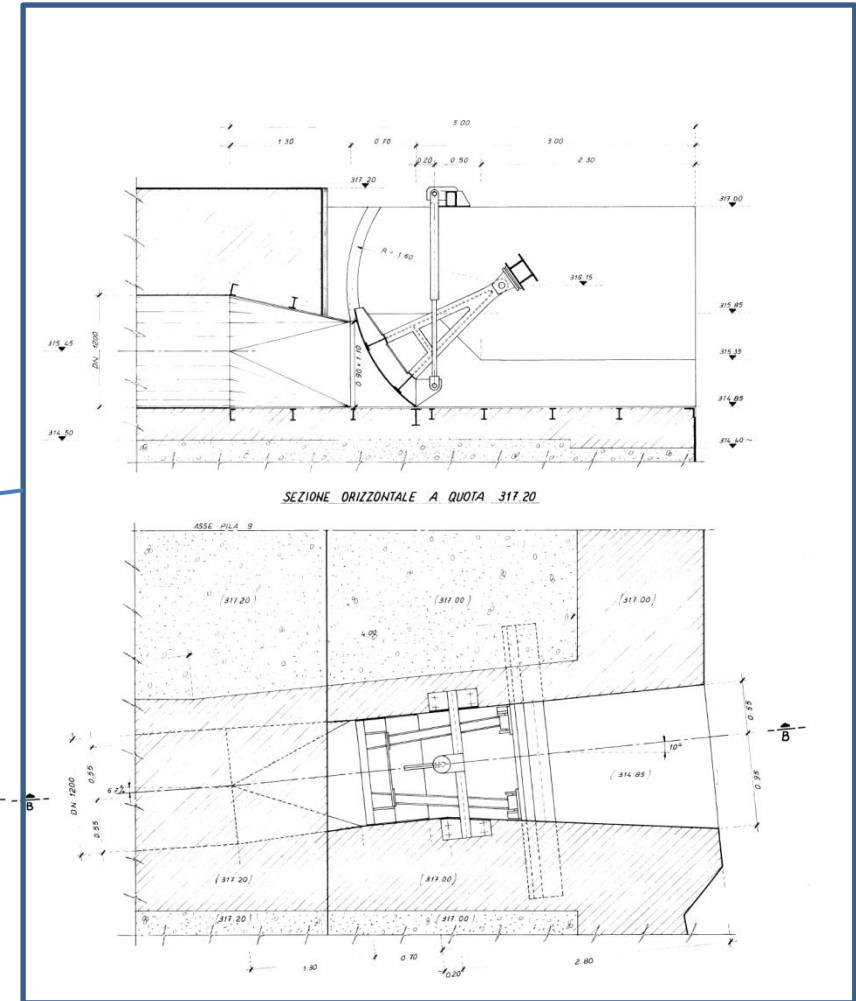
## 1) Manutenzione scarico di fondo (n. 2 condotte esistenti in acciaio $\varnothing 1200$ mm, L=56 m):

(Variante al 1° STRALCIO)

- Lato monte: sostituzione delle valvole a farfalla con paratoie piane a strisciamento 1x1 m
- Lato valle: sostituzione valvole a fuso con paratoie a settore 0,9x1,1 m



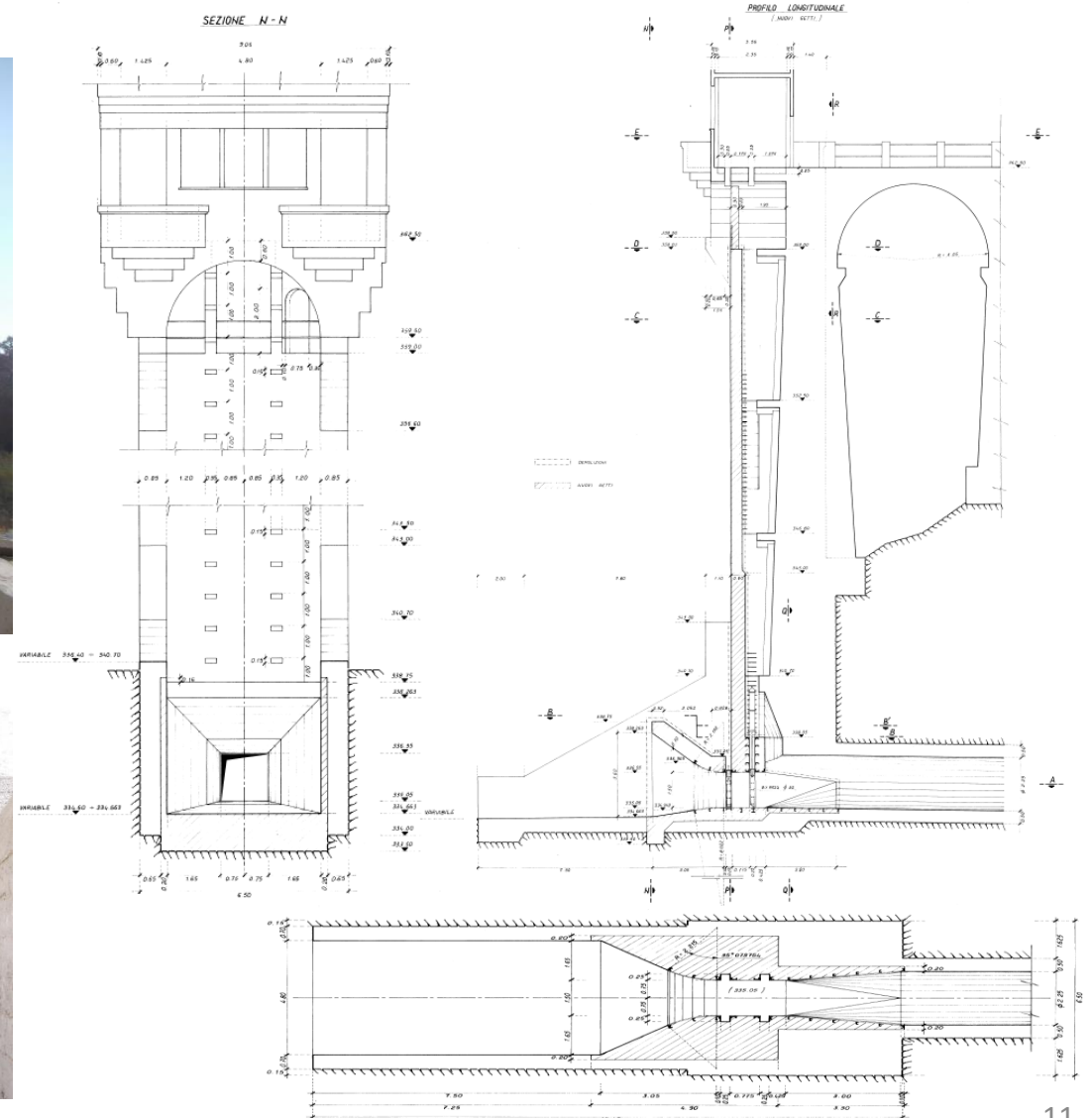
SEZIONE B - B



## 1) Manutenzione scarico di mezzo fondo (galleria in sponda destra $\varnothing 2250$ mm, L=289 m):

### (Variante al 1° STRALCIO)

- Risagomatura e blindaggio imbocco per migliorare l'idraulica (corretta aerazione, limitare la portata alla massima evacuabile in galleria, evitare vibrazioni)
- Sostituzione paratoia circolare originale, con paratoia piana a strisciamento 1,5x1,5 m
- Nuovo sistema comando paratoie in locale e dalla casa di guardia

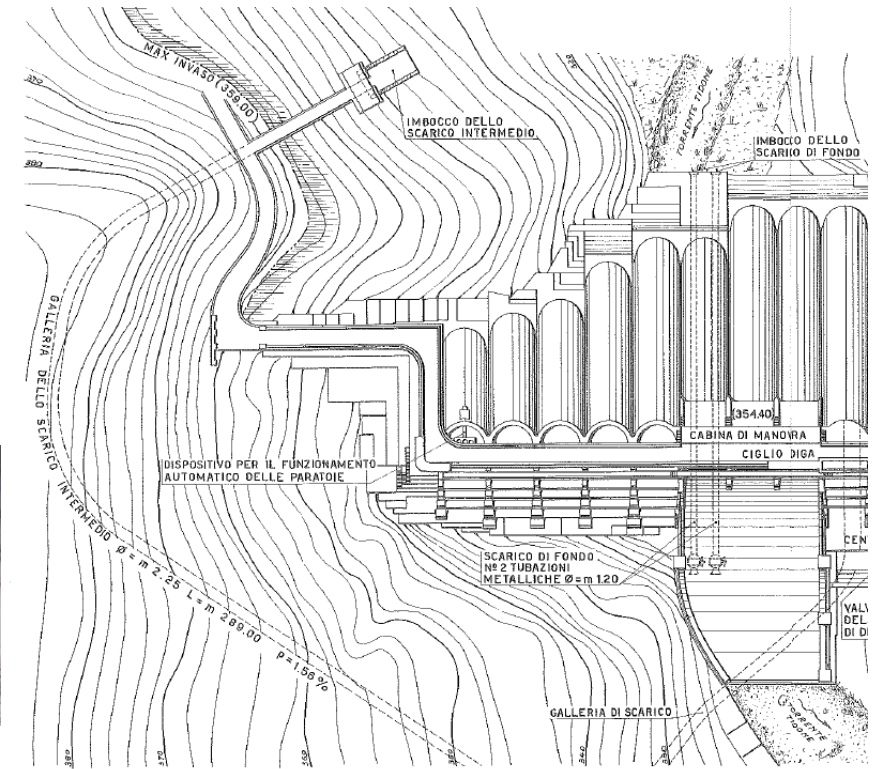
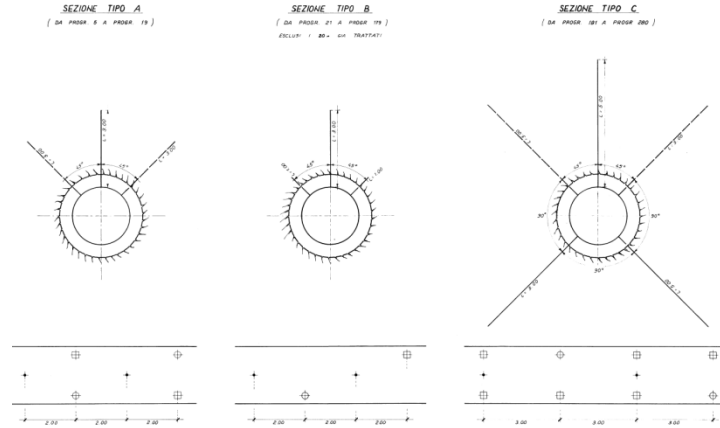




## 1) Manutenzione scarico di mezzo fondo (galleria in sponda destra $\varnothing 2250$ mm, L=289 m):

### (Variante al 1° STRALCIO)

- consolidamento galleria mezzo-fondo mediante iniezioni (al contatto roccia-calcestruzzo e nella roccia), soprattutto nei tratti di imbocco e sbocco
- demolizioni, getti e stuccature di ripristino nelle zone di rivestimento ammalorato e fessurato, in galleria





## 1) Capacità di scarico inferiore all'evento di piena T=1000 anni: incremento della capacità di scarico (2° STRALCIO)

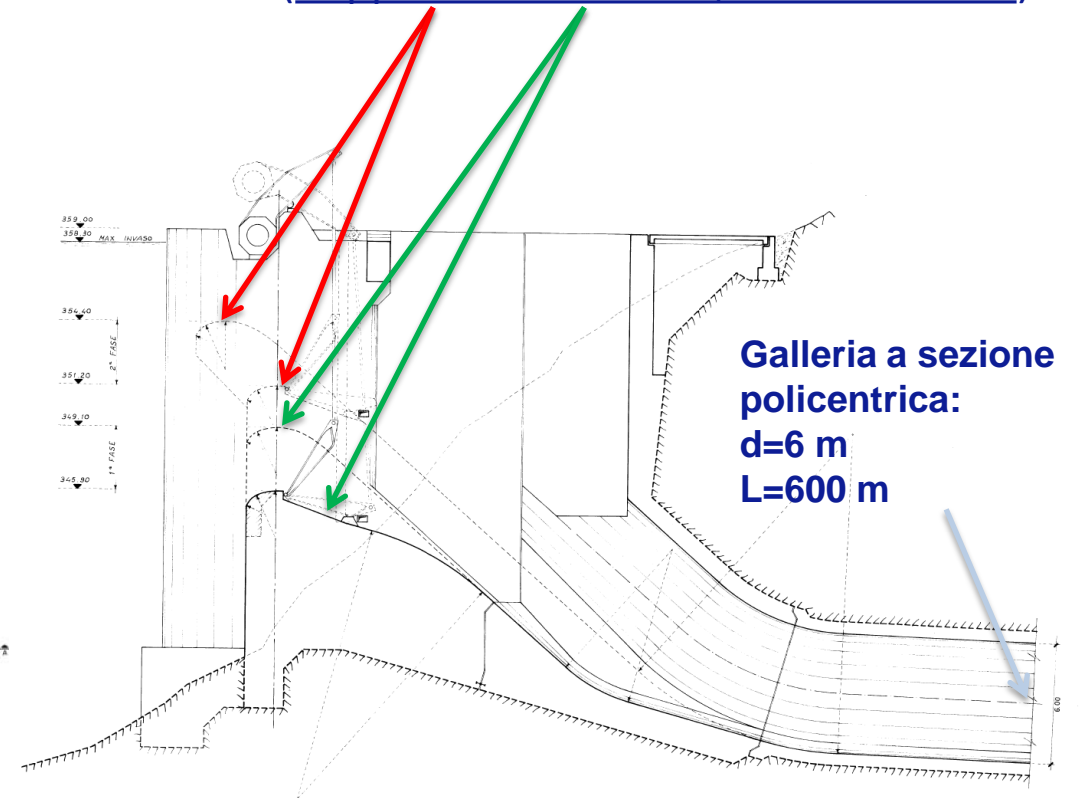
- Scarico di superficie ausiliario in sponda destra a monte dello sbarramento (doppia fase esecutiva, fine 4° stralcio)



**Soglia controllata  
da  
paratoia a ventola**

**Soglia  
libera**

**Soglia  
libera**



## 1) Capacità di scarico inferiore all'evento di piena T=1000 anni: incremento della capacità di scarico

### (2° STRALCIO + 4° STRALCIO)

#### IMBOCCO:

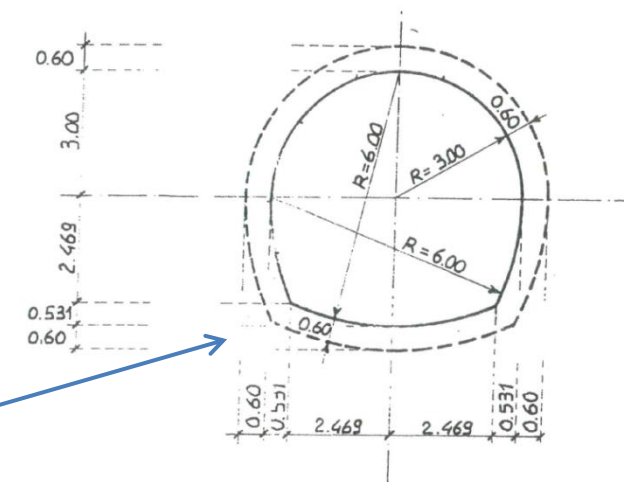
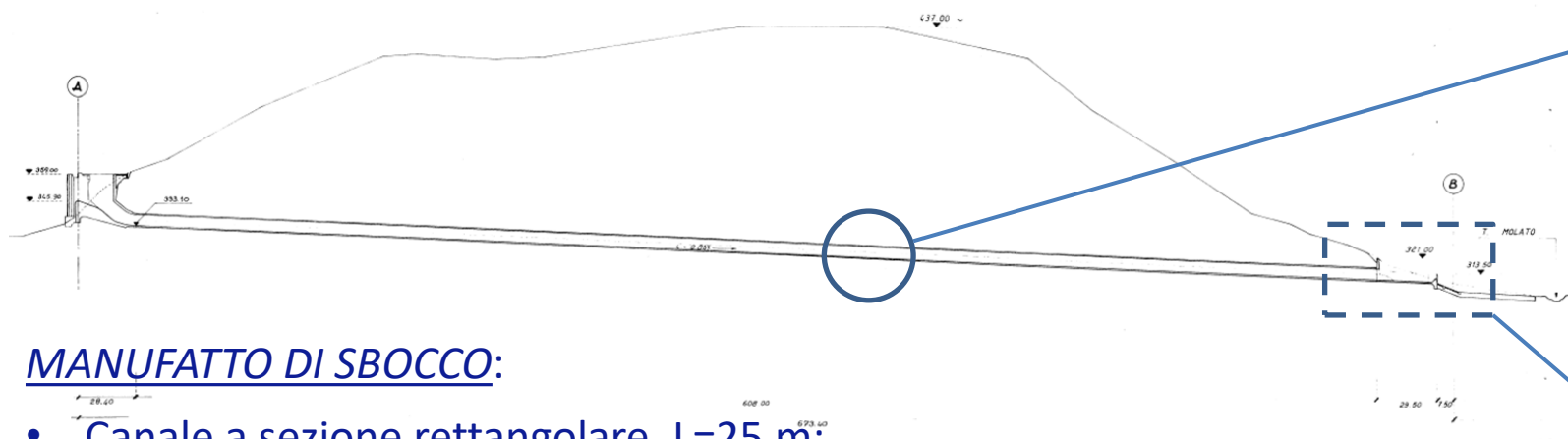
- struttura a gravità con ciglio sfiorante e profilo raccordato opportunamente alla sezione policentrica della galleria di scarico;
- due soglie fisse laterali L= 6 m cadauna ed una luce centrale con una paratoia a ventola automatica 6.00x3.20 m
- prima fase dei lavori : soglie fisse a 345,20 m s.m., fulcro paratoia a 342,00 m s.m.
- soglie sopraelevate a quota definitiva (fisse a 354,40 m s.m., paratoia 351,20 m s.m.) nel corso dei lavori di 4° stralcio



## 1) Capacità di scarico inferiore all'evento di piena T=1000 anni: incremento della capacità di scarico (2° STRALCIO)

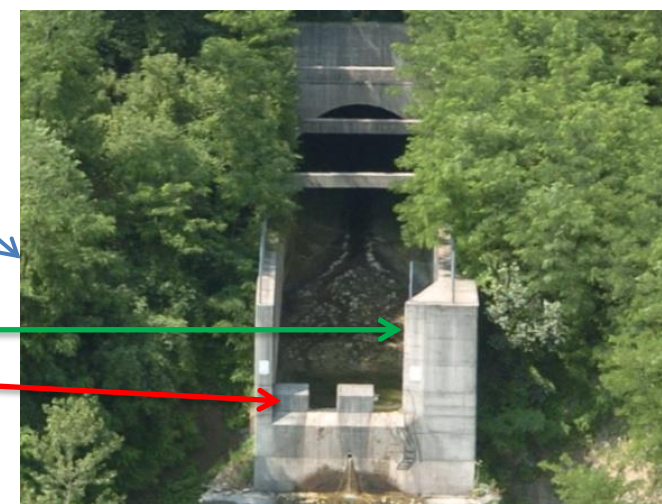
### GALLERIA:

- Asse completamente rettilineo;
- Sezione policentrica,  $D=6$  m,  $A=30$  m<sup>2</sup>, pendenza 3.4%, rivestimento cls. 60 cm,  $Q_{\max}=375$  mc/s,  $V_{\max}=19$  m/s



### MANUFATTO DI SBOCCO:

- Canale a sezione rettangolare,  $L=25$  m;
- Estremo di valle sagomato a **salto di ski**, con **denti dissipatori** e **deflettore** a sinistra che, sulle maggiori portate, unisce l'effetto di orientamento del getto a quello di dissipazione





## Modelli fisici (ENEL CRIS):

- Similitudine di **Froude**,
- scala **1:40 (opere civili, 1996)**
- scala **1:20 (par. a ventola, 1997)**
- Misure: portata, livello invaso, pressione tramite prese piezometriche, celle di carico (forze verticali su paratoia),

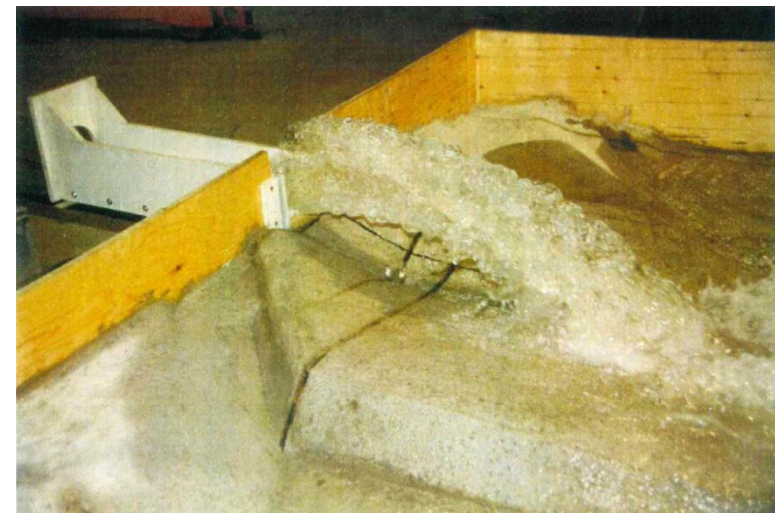
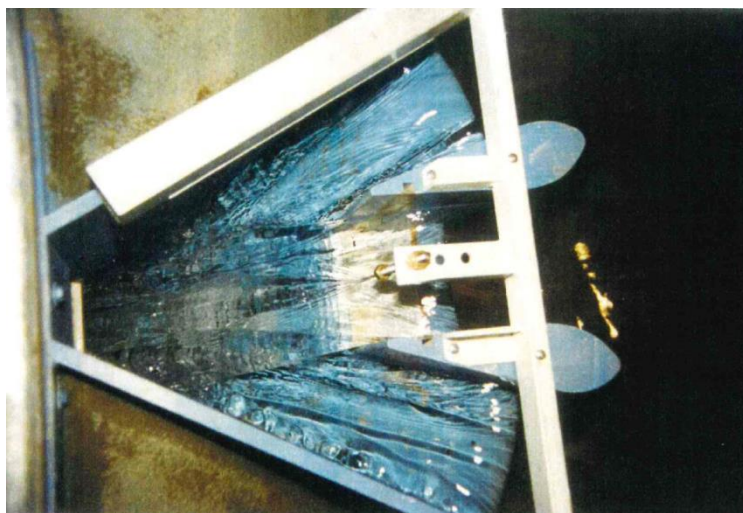
## Obiettivi «**modello paratoia**»:

- Verifica deflusso sulla paratoia
- Verifica aeroforo
- Misura P su mantello paratoia e zona sottostante alla max. apertura
- Determinazione coppie sull'asse di rotazione variando grado di apertura e carico idraulico monte



## Obiettivi «**modello opere civili**»:

- Regolarità flusso sulle soglie
- Assenza di cavitazione nei punti significativi delle soglie
- Regolare alimentazione all'imbocco della galleria
- Verifica funzionamento dissipatore allo sbocco





### 2) Comportamento strutturale, scorrimento: realizzazione schermi di impermeabilizzazione e drenaggio (3° STRALCIO)

- La roccia nei vani era protetta con solette in cls sp. 1 m, con numerose perforazioni eseguite nel tempo;
- riduzione delle sottopressioni su tutta la diga (sia corpo centrale che corpi laterali a gravità): realizzazione dei dreni regolamentari (D.M. 24/03/1982), con perforazioni  $\varnothing 200$  sino a profondità di 5 m in roccia con approfondimento  $\varnothing 85$  fino a 20 m;



- A corredo degli interventi drenanti è stato eseguito uno schermo di impermeabilizzazione all'unghia di monte finalizzato ad evitare gradienti pressori elevati nell'ammasso di fondazione, con pericolo di innesco di fenomeni migratori dei materiali più fini
- Iniezioni inclinate verso monte  $18^\circ$  e  $20^\circ$  (alternate), interasse 1 m (1.5 m spalle), profondità 30 m in roccia (15 m spalle)
- miscela di tipo 1: cemento ( $3\div 4 \text{ q/m}^3$ ) e bentonite, con permeabilità  $> 5 \text{ U.Lugeon}$
- miscela di tipo 2: ad alta penetrabilità, a base di *cementi microfini*, in zone a bassa permeabilità o come trattamento successivo al «tipo 1»

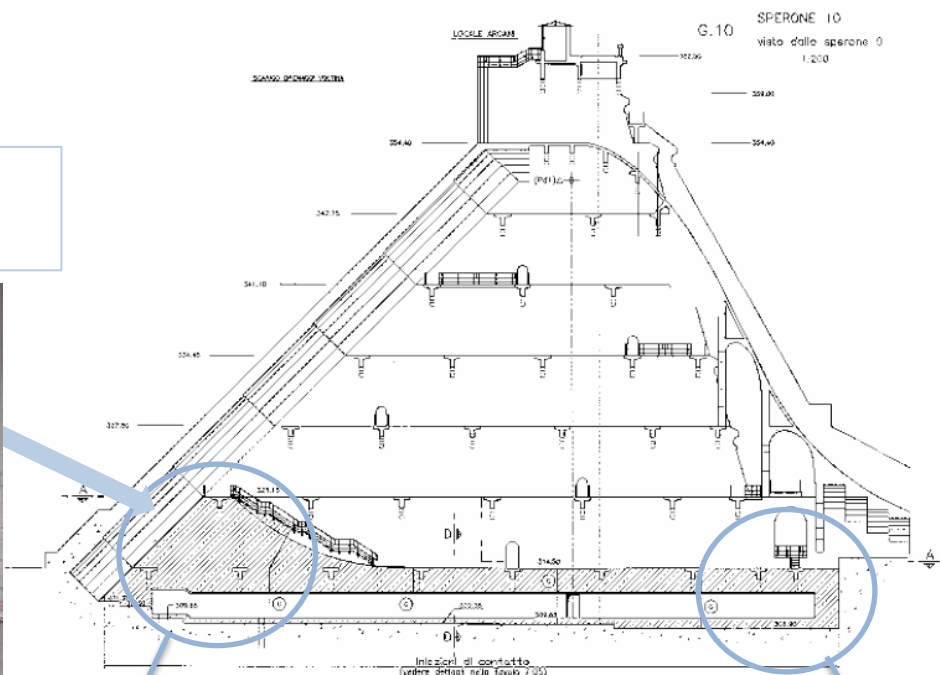
## 2) Comportamento strutturale, scorrimento: appesantimento vani diga corpo centrale

### (4° STRALCIO)

- Realizzazione di «solettoni» di appesantimento in calcestruzzo sul fondo dei vani

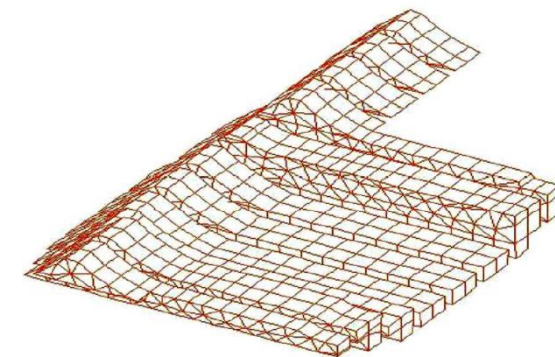
Modello a E.F. del  
solettone di appesantimento

Vista del «solettone» verso monte  
in corrispondenza di una voltina



spessori di circa 15 m  
verso la voltina

spessori compresi  
fra 4÷2.5 m

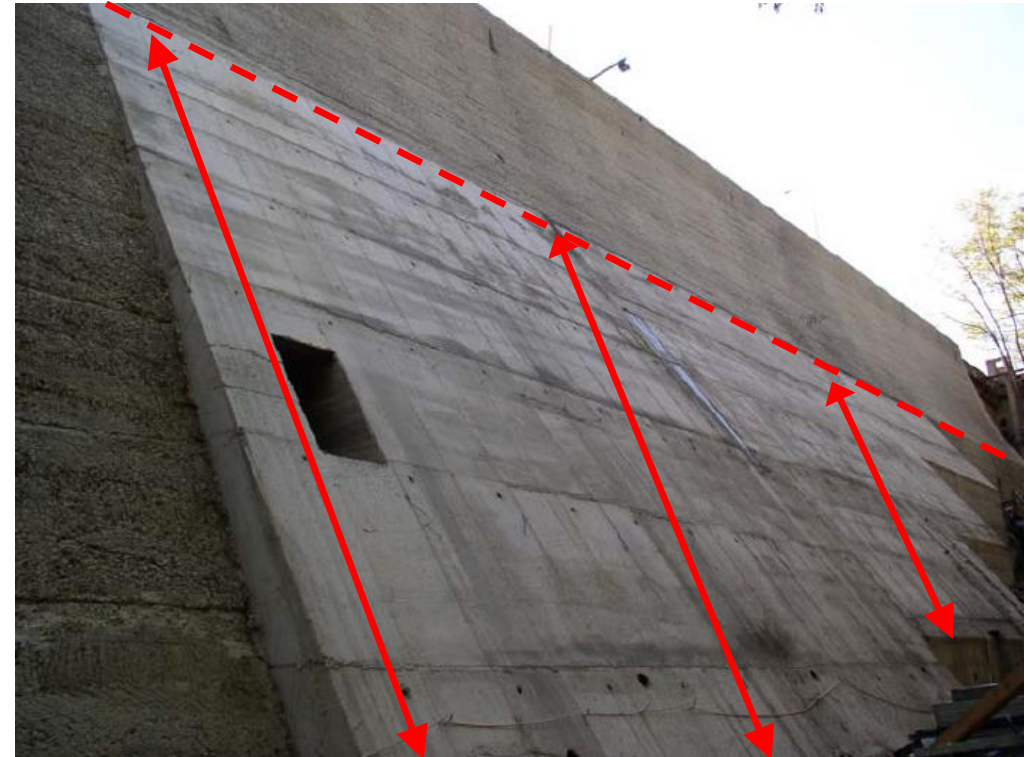
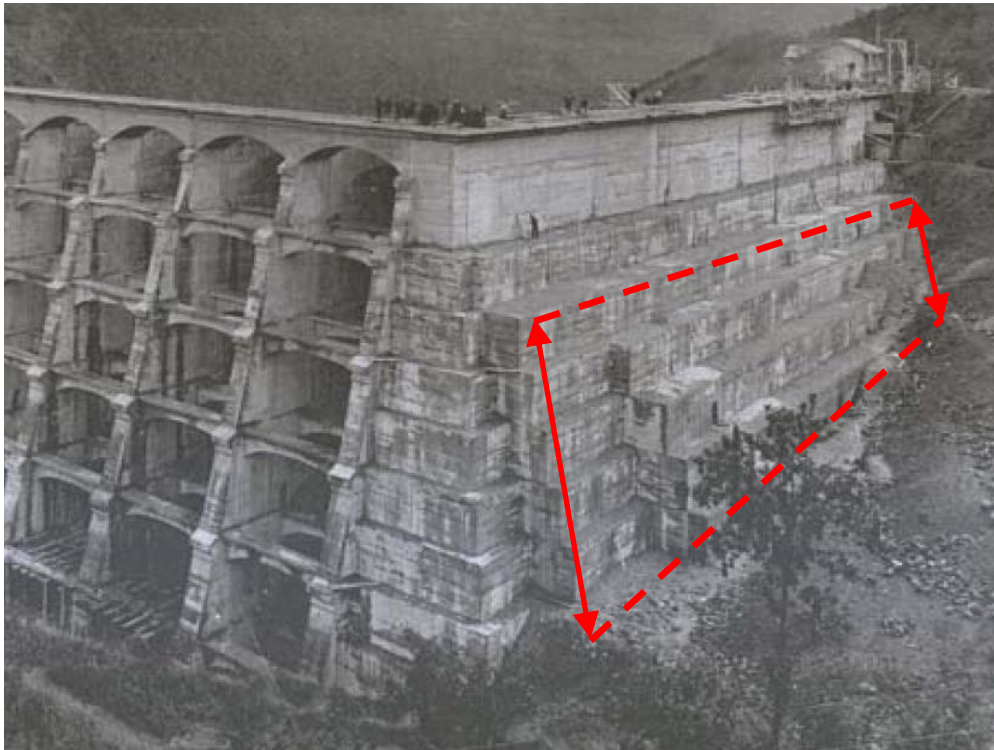


### BENEFICI:

- Migliora sicurezza allo scorrimento;
- Riduce altezza libera inflessione speroni;
- Riduce le sollecitazioni massime sugli speroni senza indurre sollecitazioni di taglio;

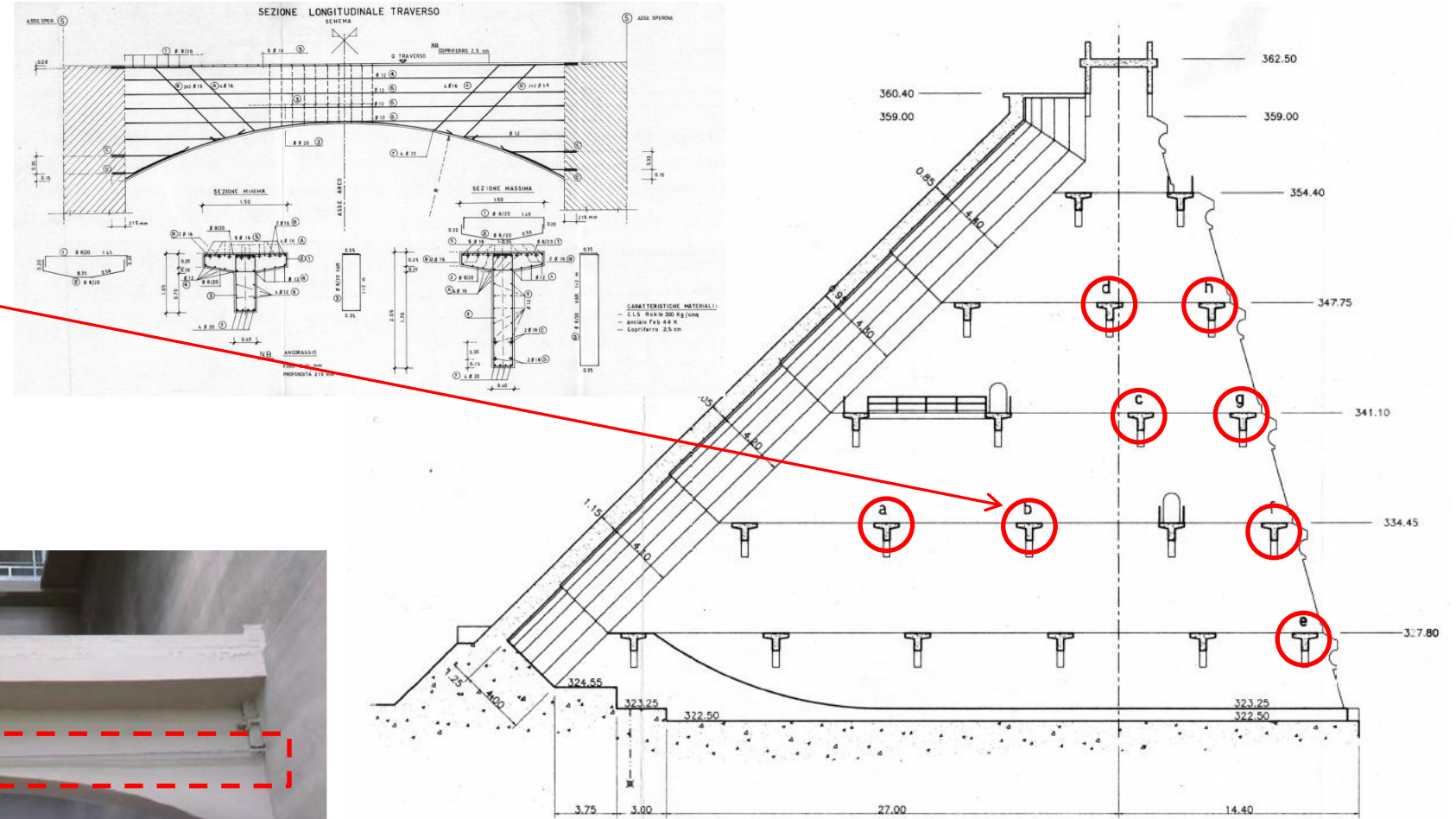
## 2) Comportamento strutturale, scorrimento : appesantimento spalla sinistra a gravità, parte bassa

- (4° STRALCIO)
- Realizzazione di nuovi getti in cls sul paramento di valle della spalla sinistra, **parte bassa**, sull'originaria configurazione a gradoni





- Ripristino statico calcestruzzi di tutti gli «sbadacchi»
- In base all'esito del modello sismico FEM della diga (settembre 1999) **n. 8 «sbadacchi»** sono stati attrezzati con barre tipo Dywidag





## 4) Degrado dei calcestruzzi: dovuta all'esposizione agli agenti atmosferici

### (4° STRALCIO)

- assicurare la conservazione delle strutture, l'integrità dei loro spessori e quindi delle loro caratteristiche funzionali e statiche, intervenendo sia su superfici originarie che su superfici già soggette ad interventi in varie epoche e con varie metodologie e che si trovavano perciò in differenti stati di conservazione
- Intervento di rimozione del calcestruzzo localmente ammalorato, con **ripristini di varia tipologia** (*leggero, medio e pesante*) e posa di **rivestimenti superficiali** a seconda della zona della struttura (superfici interne ed esterne)

**Superfici trattate: 45'000 m<sup>2</sup> !!!**



### **RIPRISTINI**

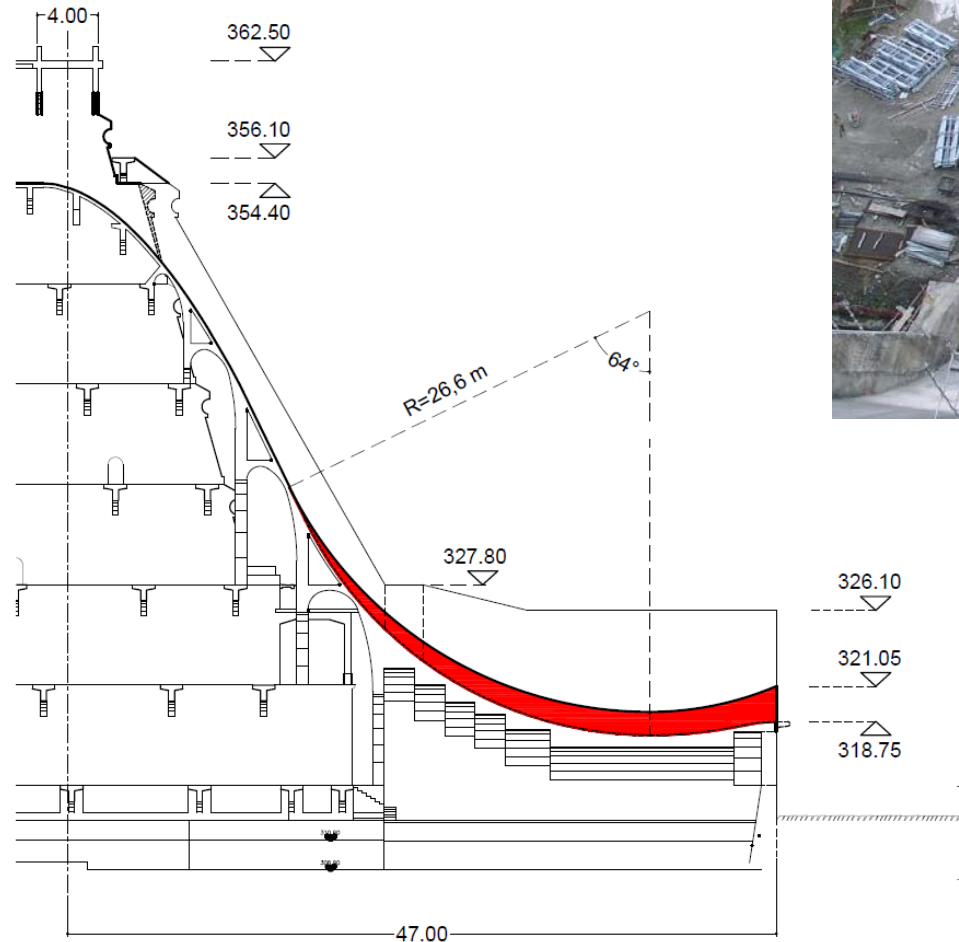
- ***Leggero***: idropulizia (<10 mm), malta bicomponente tixotropica antiritiro fibrorinforzata, modulo elastico <10'000 N/mm<sup>2</sup>;
- ***Medio***: idroscarifica (10÷40 mm), malta bicomponente tixotropica antiritiro fibrorinforzata (più passate), modulo elastico <15'000 N/mm<sup>2</sup>;
- ***Pesante***: idrodemolizione (>40 mm), betoncino premiscelato

### **RIVESTIMENTI superficiali**

- ***Interni***: malta cementizia bicomponente flessibilizzata (sp. min. 2÷4 mm)
- ***Esterni***: primer + due mani di rivestimento monocomponente a base di elastomeri etilenici modificati

## 5) Inadeguatezza degli organi di intercettazione degli scarichi: scarico di superficie in corpo diga (4° STRALCIO)

- **Risagomatura fondo scivolo** e partizione in tre luci con **deflettori di getto** al piede di valle





## Modello fisico (2003, Univ. Trieste):

- Similitudine di **Froude**, scala **1:30**
- Misure: portata, livello invaso, pressione tramite prese e trasduttori al piede dello scivolo (**verifica aderenza vena fluida**)

## Obiettivi:

- Scala deflusso soglia di sfioro in corpo diga
- Verifica funzionamento nuovi deflettori al piede scivolo
- Verifica zona di impatto del getto in uscita dal salto di ski
- Verifica del funzionamento dei blocchi dissipatori

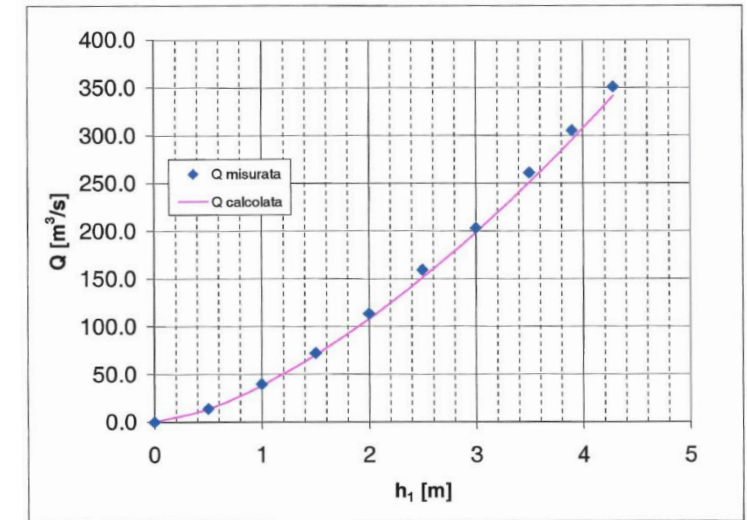


Quantità	Simbolo	scala
Distanze e dislivelli	$\lambda_L$	1:30
Velocità	$\lambda_V = \lambda_L^{1/2}$	1:5,48
Tempo	$\lambda_T = \lambda_L / \lambda_V$	1:5.48
Portate	$\lambda_Q = \lambda_L^2 \lambda_V$	1:4932
Pressioni	$\lambda_p = \lambda_L$	1:30



## Scala deflusso soglia in corpo diga:

- Scala deflusso soglia di sfioro in corpo diga
- Misure di pressione lungo la soglia di imbocco ed in mezzeria delle luci in prossimità dello spigolo di monte dove **si temeva l'insorgere di pressioni negative**



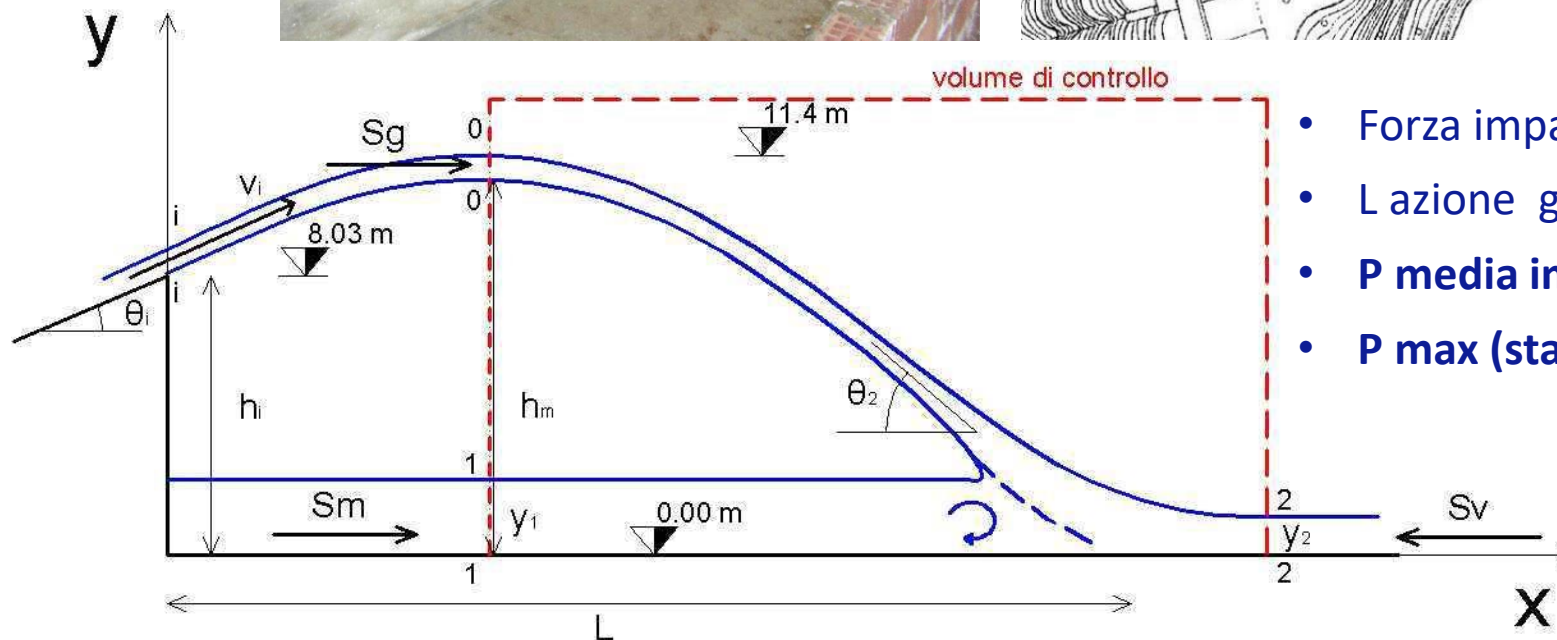
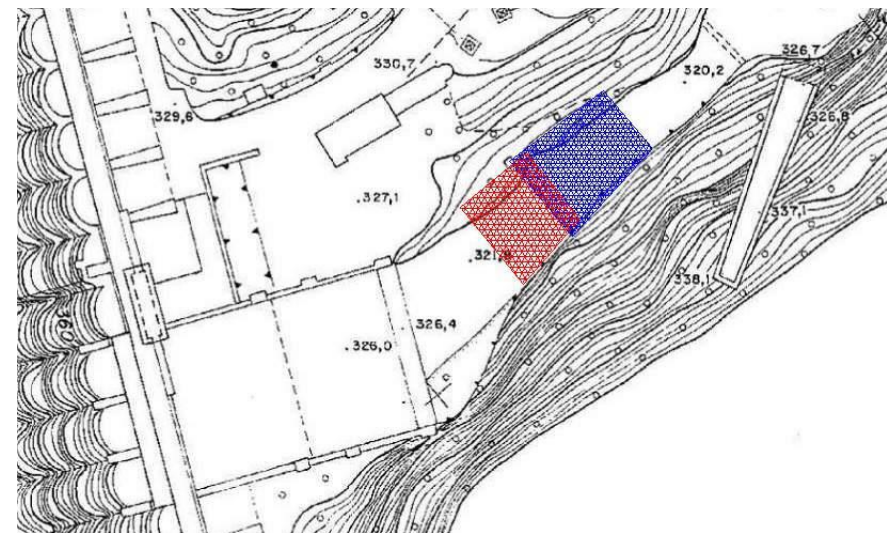
## Verifica nuovi deflettori:

- Misure di pressione tramite prese e trasduttori alla base dei deflettori di destra di ogni luce, in 6 punti
- Correzione di alcuni dettagli sui deflettori della luce sinistra





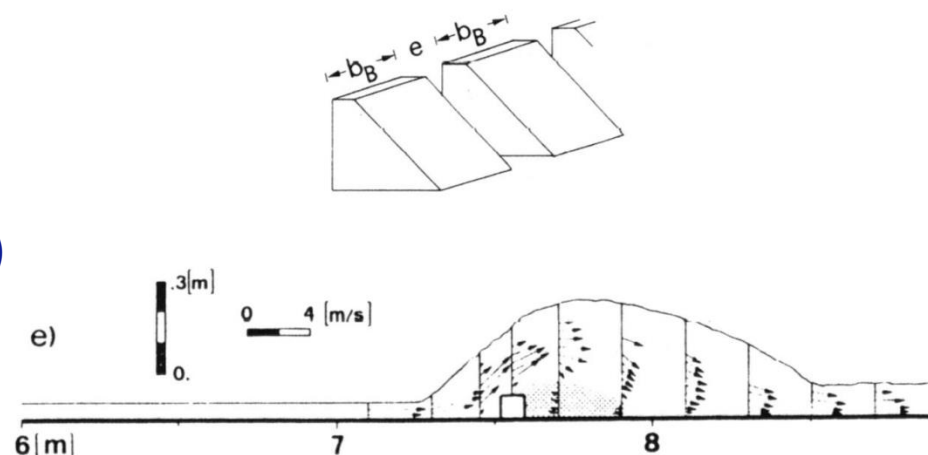
- $y_1 = 2.65 \text{ m}$



- Forza impatto getto = 479 t
- L azione getto = 3.30 m
- **P media impatto = 120 t/m<sup>2</sup>**
- **P max (stagn. point) = 294 t/m<sup>2</sup>**

## Vasca impatto getti:

- Specifico modello «*in canaletta*» per il **getto incidente sui «denti»**
- Riproduzione della corrente veloce ( $y=1.3$  m,  $v=20$  m/s,  $Fr=5.6$ ) in arrivo ai «*blocchi dissipatori*»  $b \times h = 2 \times 2$  m,  $e = 1.5$  m
- Verifica effetto dei blocchi: «rompere» la corrente veloce e deviarla in parte verso l'alto per favorire il rimescolamento nella vasca di dissipazione



## Vasca di dissipazione:

- Angolo getto incidente  $43^\circ$
- Lunghezza max. getto 40 m
- Altezza getto 17 m
- Spessore min. cuscino di acqua 4m

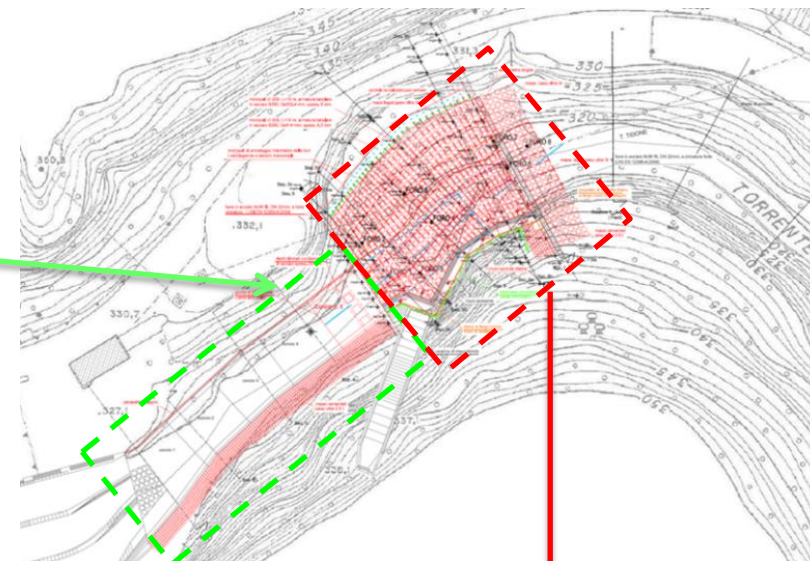
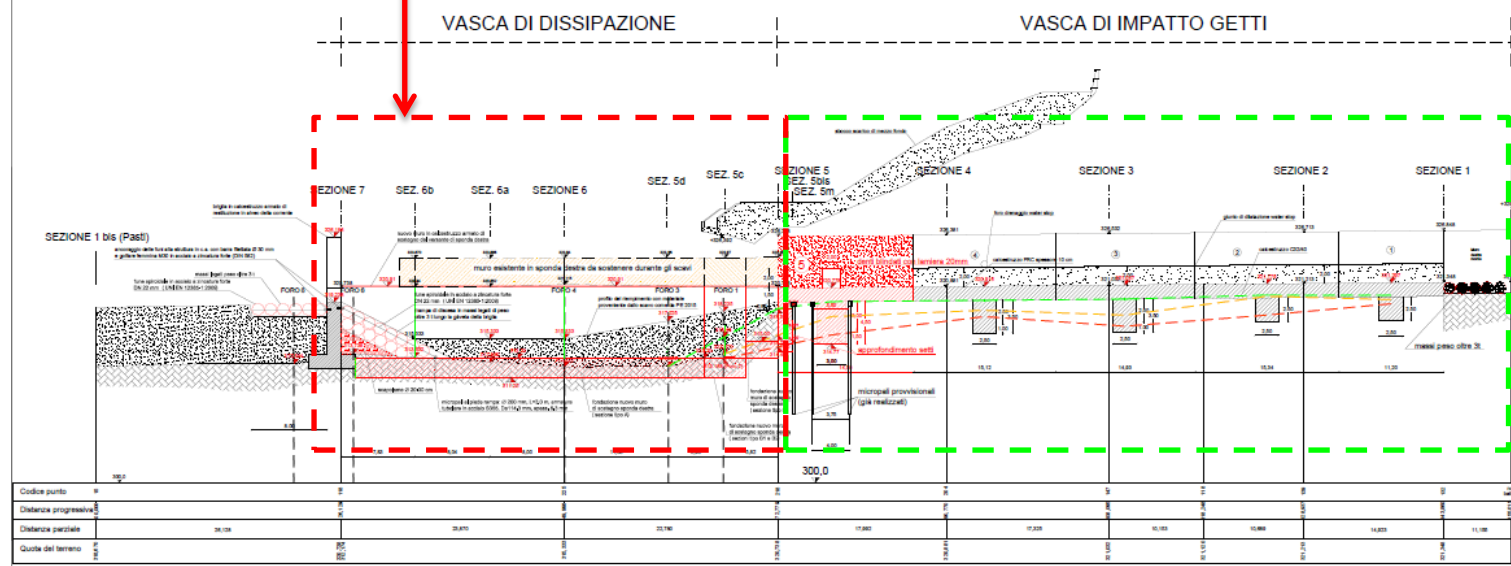




## 5) Inadeguatezza degli organi di intercettazione degli scarichi: opere di dissipazione al piede della diga

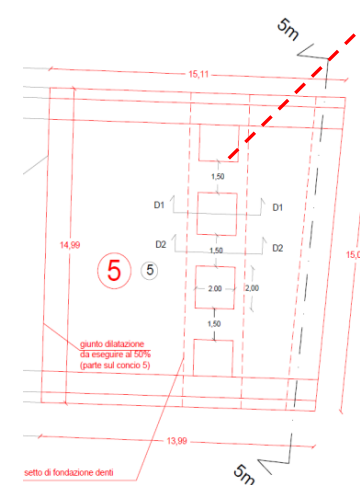
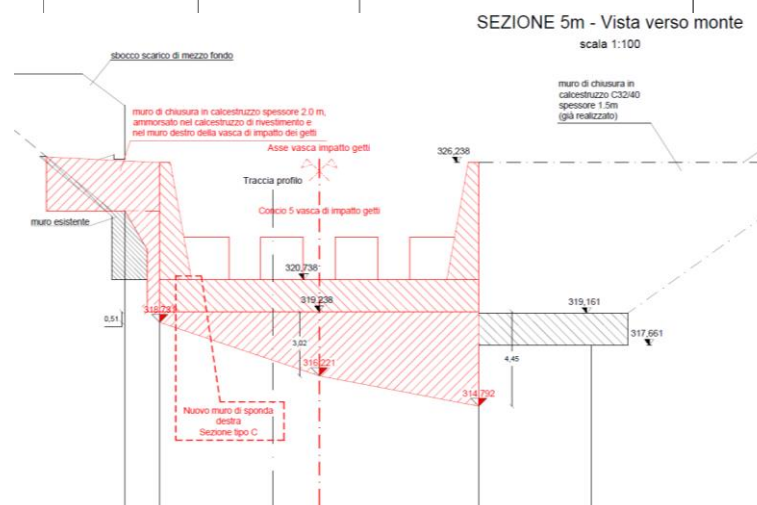
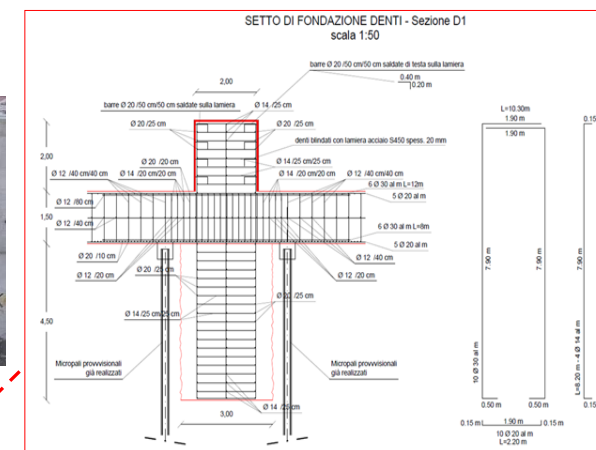
**(5° STRALCIO)** – Progetto esecutivo Prof. Ing. V. Fiorotto (2015)

- Realizzazione vasca di impatto getti, a piede diga (b=12 m, L=70 m)
- Realizzazione vasca di dissipazione, a valle della vasca di impatto getti (b=20 m, L=45 m, profondità idrica minima 4 metri)





- Realizzazione della **vasca di impatto getti**

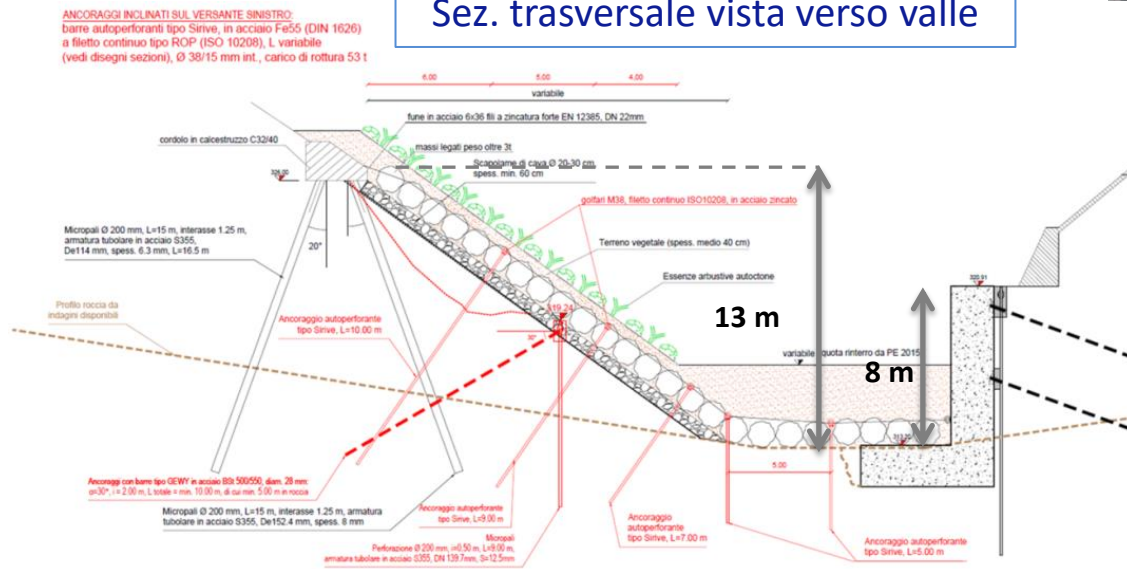


- 5 conci, in cls. armato, sezione ad «U», B=12 m, L=11-15 m;
- particolari **giunti** di **dilatazione** con **water-stop** fra conci adiacenti per consentire comunque lo **sfogo delle sottopressioni** in caso di rottura del giunto a tenuta;
- **blocchi dissipatori** a fine vasca;

## Opere di dissipazione al piede della diga

- Realizzazione della **vasca di dissipazione**: a sezione trapezia
- Sponda sinistra, massi ciclopici legati
- Sponda destra, muro massivo in cls. armato fondato in roccia

Sez. trasversale vista verso valle



Protezione al fondo ed in sponda sinistra con **massi di granito (>3t) legati a mezzo di funi Ø22 mm di acciaio zincato, ancorate a cordolo in c.a. fondato su micropali a cavalletto**



## Opere di dissipazione al piede della diga

- Realizzazione della **vasca di dissipazione**



La vasca di dissipazione termina a valle con una **briglia in calcestruzzo armato**, fondata in roccia, mentre il **raccordo all'alveo di valle** avviene mediante protezione in **massi ciclopici legati**



# Giornata di studio ITCOLD: MANUTENZIONI GRANDI DIGHE



**IN ALTO:** stato di fatto alveo a valle diga (2015, prima dell'inizio lavori)



**A DESTRA:** vasca impatto getti e vasca dissipazione  
(22 febbraio 2022, lavori quasi terminati)



# Giornata di studio ITCOLD: MANUTENZIONI GRANDI DIGHE



**Grazie per l'attenzione !**