



CTG

Italcementi Group

Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo

DIGA DI CASSIGLIO

APPESANTIMENTO CORPO DIGA

12 - Studio su modello idraulico delle opere
di sfioro e di dissipazione della diga di
Cassiglio



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
IDRAULICA, MARITTIMA, AMBIENTALE E GEOTECNICA
I M A G E

STUDIO SU MODELLO IDRAULICO
DELLE OPERE DI SFIORO E DI DISSIPAZIONE
DELLA DIGA DI CASSIGLIO (BERGAMO)

(Italgen s.p.a. – P&P Consulting Engineers s.r.l.)



Padova, Luglio 2006

1. Premesse

Lo studio di ingegneria P&P Consulting Engineers s.r.l., sede legale via dalla Chiesa 11, 24020 Scanzorosciate (BG) - tel. 035 668244, fax 035 668245, sta sviluppando, per conto della Società ITALGEN s.p.a (Gruppo ITALCEMENTI), il progetto di ristrutturazione ed adeguamento della diga di Cassiglio (BG) di proprietà di quest'ultima.

Tale progetto prevede fra l'altro l'appesantimento del corpo diga a monte e l'adeguamento del profilo sfiorante e del bacino di dissipazione alla nuova portata di progetto, che passa da 110 a 170 m³/s.

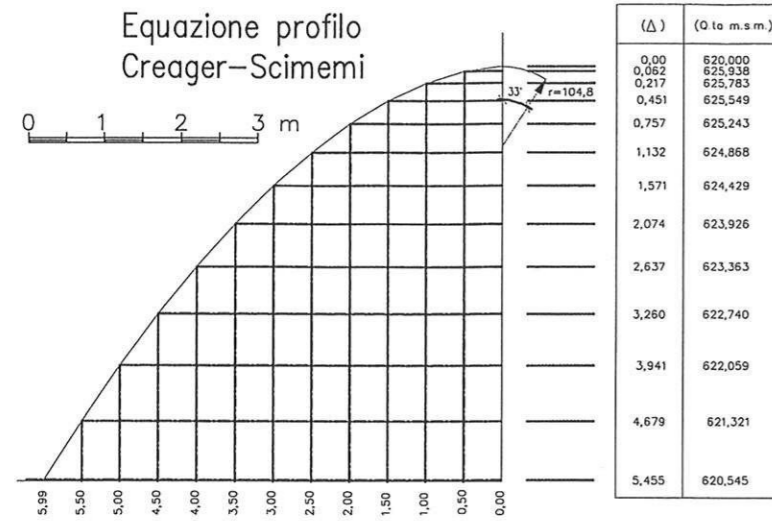
Su invito di ITALGEN, la P&P Consulting Engineers ha deciso di far svolgere uno studio su modello idraulico per la verifica delle opere di sfioro e dissipazione relativamente alla diga di Cassiglio, affidando al Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale e Geotecnica (IMAGE) dell'Università di Padova, con lettera in data 20.06.05, prot. IMAGE n. 306/05 del 27.06.05, l'incarico di svolgere il predetto studio.

Prima di tale data, si erano avuti contatti informali fra l'ing. Aldo Castoldi della P&P Consulting Engineers ed i proff. Luigi Da Deppo e Paolo Salandin del Dipartimento IMAGE con lo scopo di definire i termini economici dell'offerta, le modalità di realizzazione del modello e di svolgimento delle prove. In particolare in data 9 maggio 2005 l'ing. Castoldi trasmetteva via e-mail all'attenzione del prof. Da Deppo la richiesta di preventivo ed alcuni disegni relativi alla diga. In data 11 giugno 2005 il prof. Salandin trasmetteva via e-mail all'ing. Castoldi l'offerta, che comunicava l'accettazione della stessa via e-mail in data 24 giugno 2005.

In una prima riunione tenutasi presso il Laboratorio del Dipartimento IMAGE in data 11 luglio 2005 - presenti i proff. Luigi Da Deppo e Paolo Salandin per il Dipartimento, l'ing. Aldo Castoldi per la P&P Consulting Engineers e l'ing. Marco Pegoraro, per la Società CTG Italcementi Group incaricata dello sviluppo del progetto di appesantimento -, il Committente prendeva visione della canaletta ove si sarebbero svolte le prove, della scala del modello e veniva informato sulle modalità di svolgimento delle stesse prove. Lo stesso Committente s'impegnava inoltre a fornire entro breve tempo i dati mancanti necessari alla realizzazione del modello e delle prove.

Come già detto, le prove su modello riguardano lo scarico di superficie della diga e la vasca di dissipazione a valle illustrate in Tavola 1, che fa riferimento al progetto originale di appesantimento.

Lo scarico di superficie è costituito da uno sfioratore a soglia libera a quota 626,00 m s.m.m. sagomato secondo un profilo Creager - Scimemi dello sviluppo complessivo di 21,30 m, suddiviso da due pile a fronti arrotondati larghe 0,60 m e lunghe 1,80 m ciascuna, in tre luci dallo sviluppo netto di 6,70 m ciascuna.



ORIGINALE
 Scala disegno 1:200
 sul reale
 Scala modello 1:43

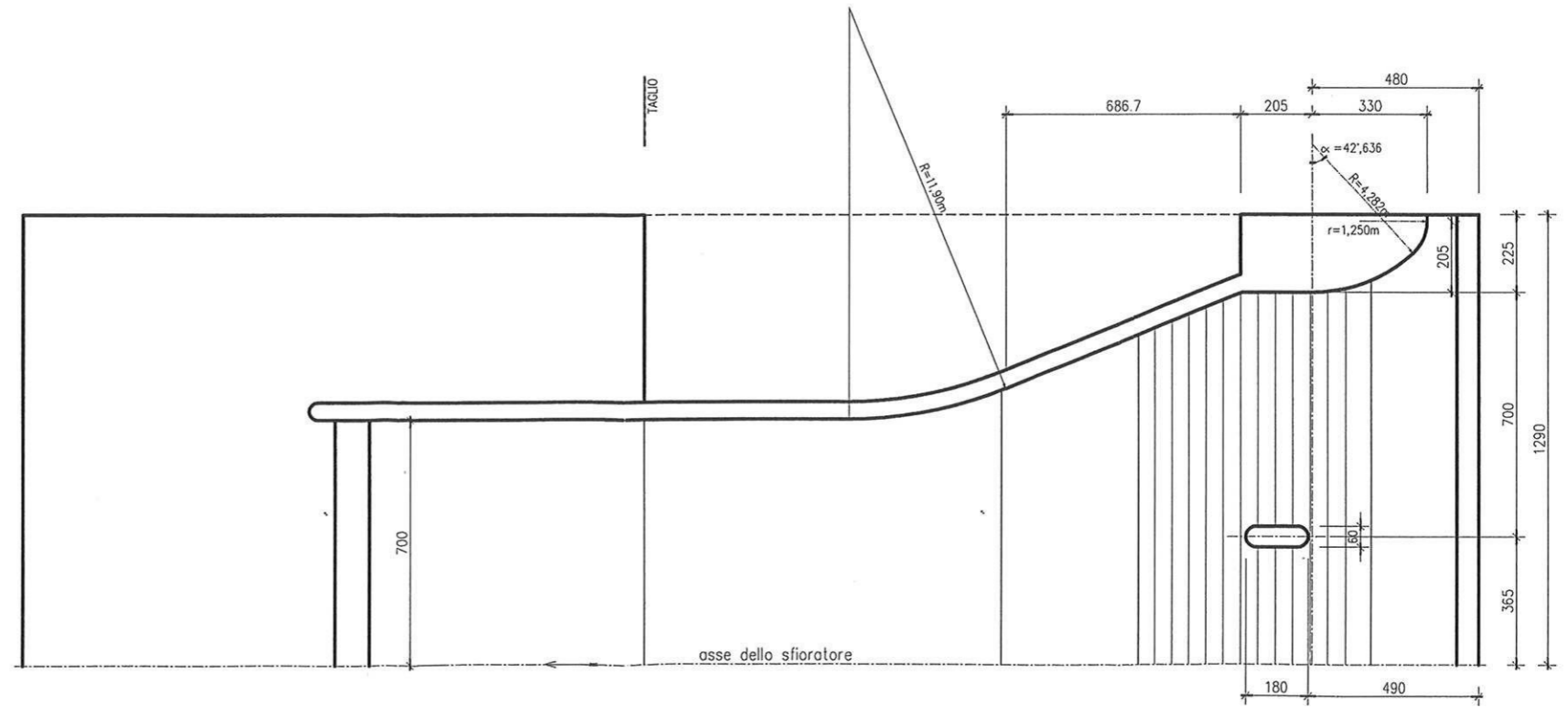
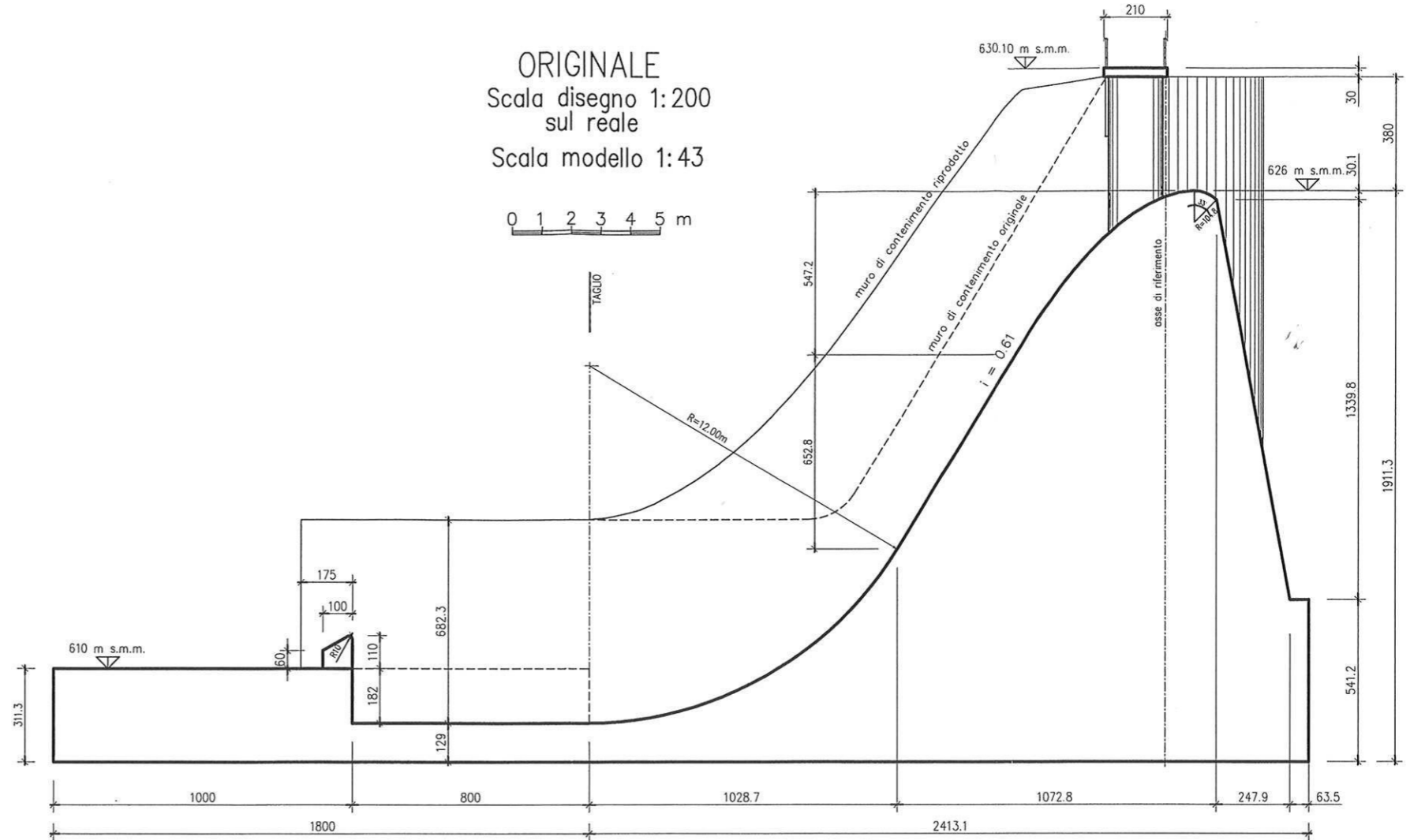


Tavola1: pianta e sezione del modello nella sua configurazione originale.

Il profilo Creager-Scimemi dello sfioratore è raccordato con il paramento di valle a pendenza costante $i=0,61$ e, successivamente, con un arco di cerchio del raggio di 12 m, fino al fondo della vasca di dissipazione posto a quota 608,18 m s.m.m. Dal punto di vista planimetrico la vasca di dissipazione si stringe da 21,30 m (a quota 626,00 m s.m.m.) a 14,00 m (a quota 608,18 m s.m.m.) con una opportuna sagomatura dei muri di contenimento laterali.

La vasca di dissipazione larga 14 m è rivestita in calcestruzzo e termina con un gradino che si rialza dal fondo di 1,82 m, riportandosi alla quota 610,00 m s.m.m. dell'alveo. Al termine della vasca è posto un gradino sagomato, largo 1,00 m, che sporge dal fondo alveo di 1,10 m.

Il programma delle ricerche concordato dal Dipartimento con il Committente prevede la verifica in condizioni stazionarie dello scarico di superficie e della vasca di dissipazione per una portata massima (su prototipo) di 177 m³/s, superiore quindi alla massima portata di progetto da assumersi come s'è detto in 170 m³/s, riproducendo in scala 1:43, a partire dal profilo sfiorante di monte fino a gradino posto al termine della vasca di dissipazione, metà del profilo tracimabile facendo coincidere l'asse di simmetria dell'opera con una parete del canale in cui il modello stesso verrà posizionato.

2. Descrizione del modello.

La natura dei fenomeni da esaminare su modello comporta la riproduzione secondo la similitudine di Froude.

La scala di riproduzione adottata è stata $\lambda=1:43$. Questa scelta permette accettabili dimensioni del modello ed assicura una corretta riproduzione dei fenomeni da indagare.

Le scale per il trasferimento dei risultati dal modello al reale sono:

lunghezze:	$\lambda=1:43$	velocità:	$\lambda^{1/2}=1:6,557$
tempi:	$\lambda^{1/2}=1:6,557$	portate:	$\lambda^{5/2}=1:12124,7$

Il manufatto che riproduce profilo sfiorante e la vasca di dissipazione è stato inserito in una canaletta del Laboratorio del Dipartimento IMAGE, alimentata da una tubazione DN 150 collegata con il circuito idraulico del laboratorio del Dipartimento (Figura 1).

La misura delle portate è realizzata tramite un misuratore di portata magnetico – induttivo Promag 30 F della ditta Endress+Hauser installato sulla tubazione di alimentazione, mentre per la misura delle quote si è ricorsi all'uso di due idrometri a punta al nonio di millimetro installati su carrelli scorrevoli.

Nella Foto 1 si può vedere il modello nella configurazione originale inserito nella canaletta in plexiglas, mentre nella Foto 2 è riportata una vista da valle.

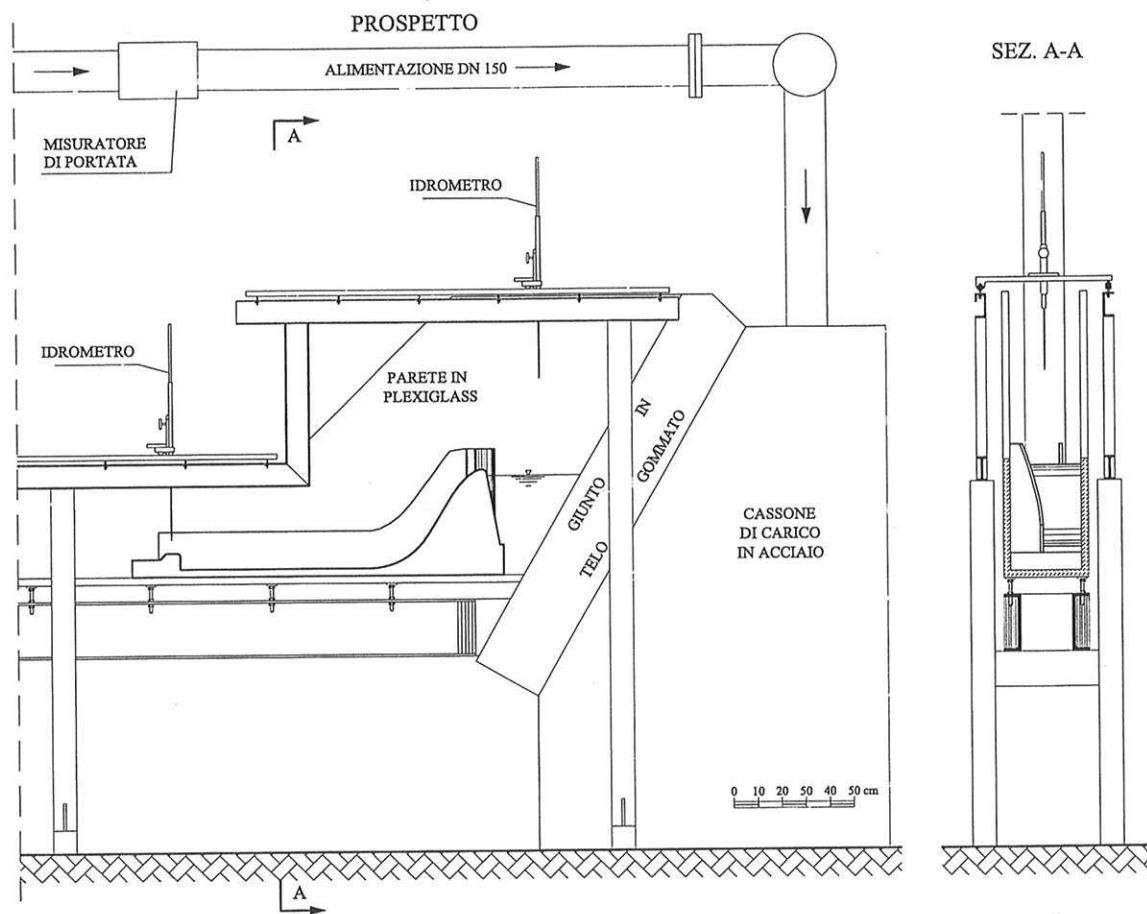


Figura 1: schema dell'installazione in laboratorio del modello.

E' da sottolineare come i muri di contenimento laterale della vasca di dissipazione siano come da progetto con sommità a quota corrispondente a 615,00 m s.m.m. nel prototipo, quelli relativi allo sfioratore sono stati riprodotti nel modello con una certa "abbondanza" rispetto a quelli che erano in progetto. Questo al fine di garantire in ogni caso il contenimento laterale della vena, potendo in qualsiasi momento a posteriori dedurre quello che è il valore corretto delle quote da assumersi per tali manufatti.

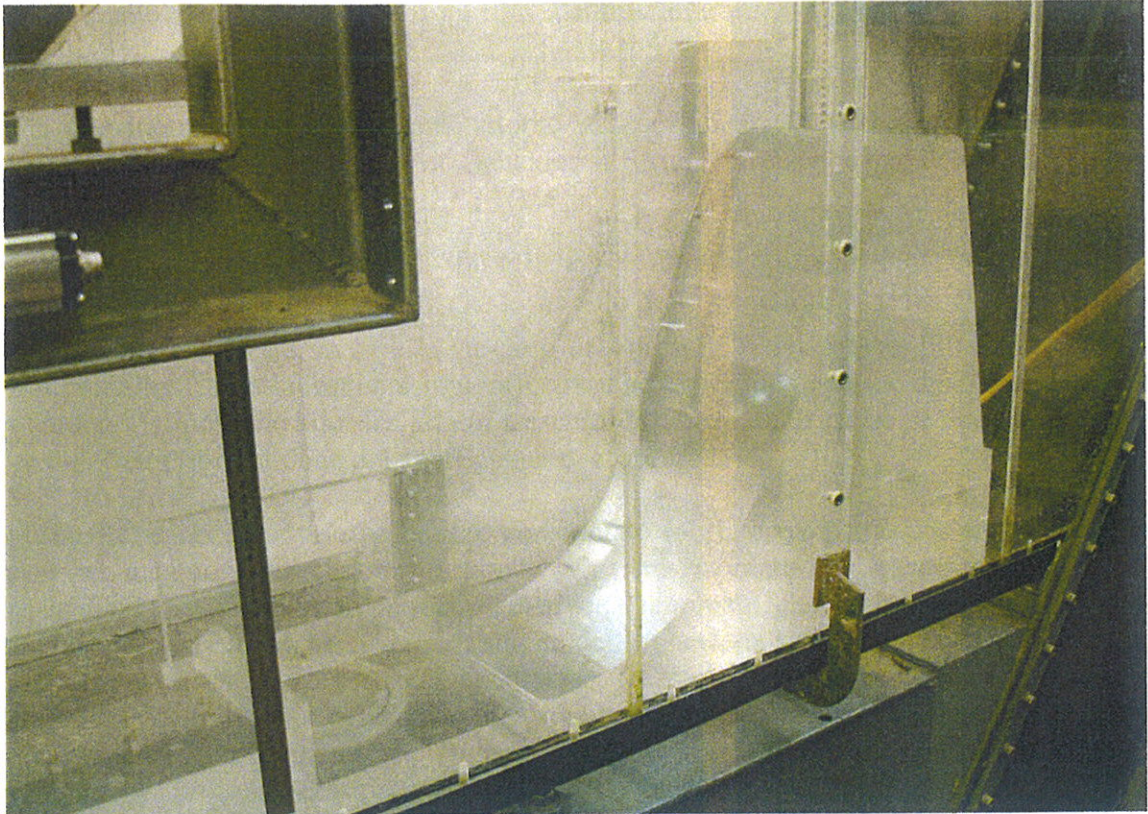


Foto 1: veduta laterale del modello della di Cassiglio nella configurazione originale inserito nella canaletta in plexiglas.

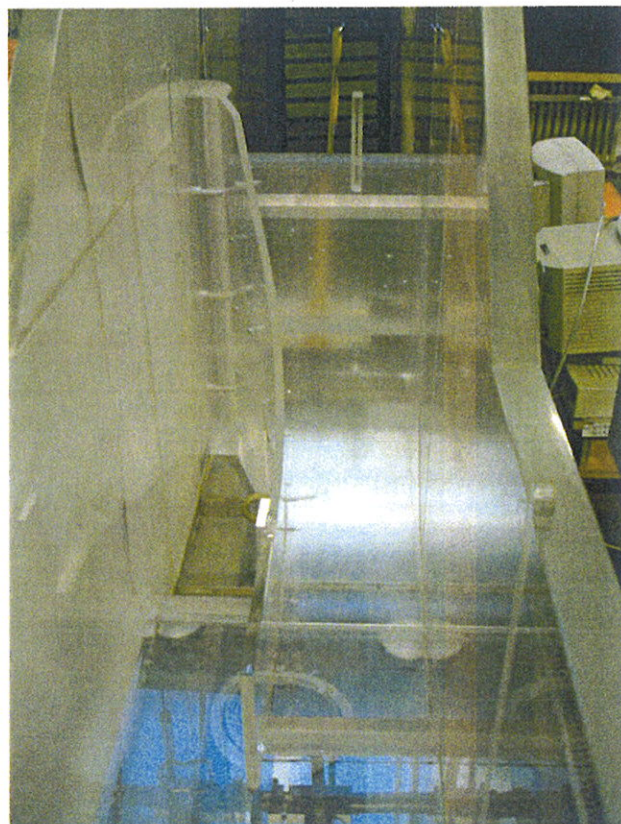


Foto 2: veduta da valle del modello nella configurazione originale inserito nella canaletta in plexiglas.

L'intero manufatto riprodotto il profilo dello sfioratore e la vasca di dissipazione è realizzato in plexiglas.

Alcune considerazioni sono da farsi attorno ai coefficienti di scabrezza nel reale e nel modello. Utilizzando la relazione di Gauckler – Strickler la scala per il trasferimento del coefficiente K_s da modello a reale è $\lambda^{1/6}=1:1,872$. Ciò implica che se nel modello il plexiglas ha scabrezza dell'ordine di $100 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ la scabrezza corrispondente nel reale viene ad essere $K_s \cong 53 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ciò comporta che lo scivolo dello sfioratore è certamente meno scabro nel reale che nel modello, mentre la vasca di dissipazione risulta essere più scabra nel reale che nel modello. Causa la limitatissima influenza che le perdite di carico distribuite hanno nel caso studiato, si possono ritenere affatto trascurabili le eventuali modeste variazioni relative alla non perfetta riproduzione del coefficiente di scabrezza.

In questa Relazione, le varie grandezze considerate (portate, velocità, pressioni, ecc.) sono riferite, per maggior comodità, all'originale. Va però ricordato che il trasferimento al reale delle valutazioni osservate su modello relative a fenomeni che comportino trascinamento d'aria deve farsi con qualche cautela a ragione dell'imperfetta similitudine che può realizzarsi in rapporto a questa categoria di fenomeni. Il trascurare su modello i fenomeni di trascinamento dell'aria risulta nel caso in esame comunque cautelativo. Sul reale il fenomeno sarà certamente più evidente e la vena risulterà più frastagliata con un conseguente incremento del processo dissipativo nella sottostante vasca, ma anche con maggiori tiranti lungo lo scivolo.

3. Comportamento delle opere nella configurazione originale.

La prima verifica effettuata è stata mirata alla riproduzione della scala delle portate scaricate dallo sfioratore di superficie per diverse quote del lago.

In Tabella I sono riportate le quote del lago rilevate su modello circa 290 mm a monte dal ciglio sfiorante per diversi valori di portata in condizioni di moto stazionario.

Tabella I: andamento delle portate scaricate in funzione del tirante misurato con riferimento alla quota di sommità del profilo sfiorante (626,00 m s.m.m.).

Portate		Altezze misurate	
Reale (m^3/s)	Modello (l/s)	Reale (m)	Modello (mm)
30	1,237	0,735	17,1
60*	2,474	1,191	27,7
90	3,711	1,561	36,3
110*	4,536	1,780	41,4
130	5,361	1,974	45,9
150	6,186	2,172	50,5
177*	7,299	2,408	56,0
200	8,248	2,589	60,2

* rilievo fotografico

Come risulta evidente anche dalla Figura 2, per la portata $Q=177 \text{ m}^3/\text{s}$, la quota del lago risulta di $628,41 \text{ m s.m.m.}$, inferiore a quella prevista per il massimo invaso e pari a $628,62 \text{ m s.m.m.}$, valore, questo, non raggiunto neppure per la portata $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$.

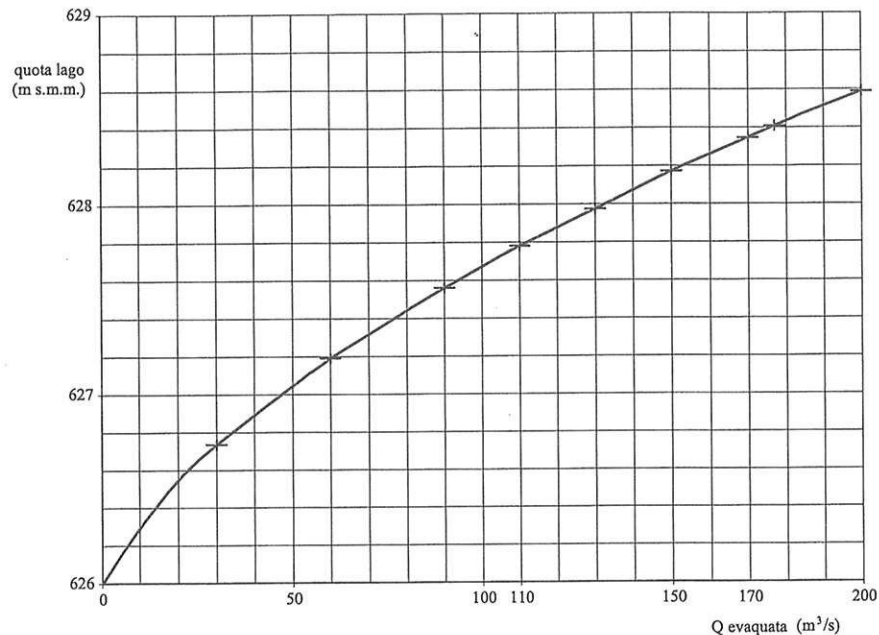


Figura 2: andamento delle quote liquide in funzione delle portate scaricate.

Le modifiche previste al profilo sfiorante inducono quindi un leggero stato di depressione della vena con il conseguente incremento del coefficiente di deflusso che risulta superiore al classico valore di $0,48$ tipico del profilo Creager – Scimemi.

Non altrettanto soddisfacente è risultato invece il comportamento degli organi di dissipazione, dei quali si è analizzato il comportamento per diversi valori di portata ponendo attenzione che la condizione al contorno assunta a valle del modello garantisse il libero deflusso delle acque in condizione critica o supercritica. Tale assunzione, dedotta dalle caratteristiche morfologiche dell'alveo che presenta notevoli pendenze a valle della diga, risulta in ogni caso essere la più cautelativa per quanto riguarda la localizzazione del risalto idraulico.

Nelle Foto dalla 3 alla 6 è illustrato il comportamento del risalto idraulico per le portate $Q=60, 110$ e $177 \text{ m}^3/\text{s}$.

Come risulta evidente, solo per il minore di tali valori il risalto idraulico risulta adeguatamente contenuto entro la vasca di dissipazione.

In particolare, come si evince dalla Foto 6, per la portata di $177 \text{ m}^3/\text{s}$, non c'è reale formazione del risalto idraulico e la condizione di transizione sopra il gradino di fondo è ben lontana da essere quella critica.

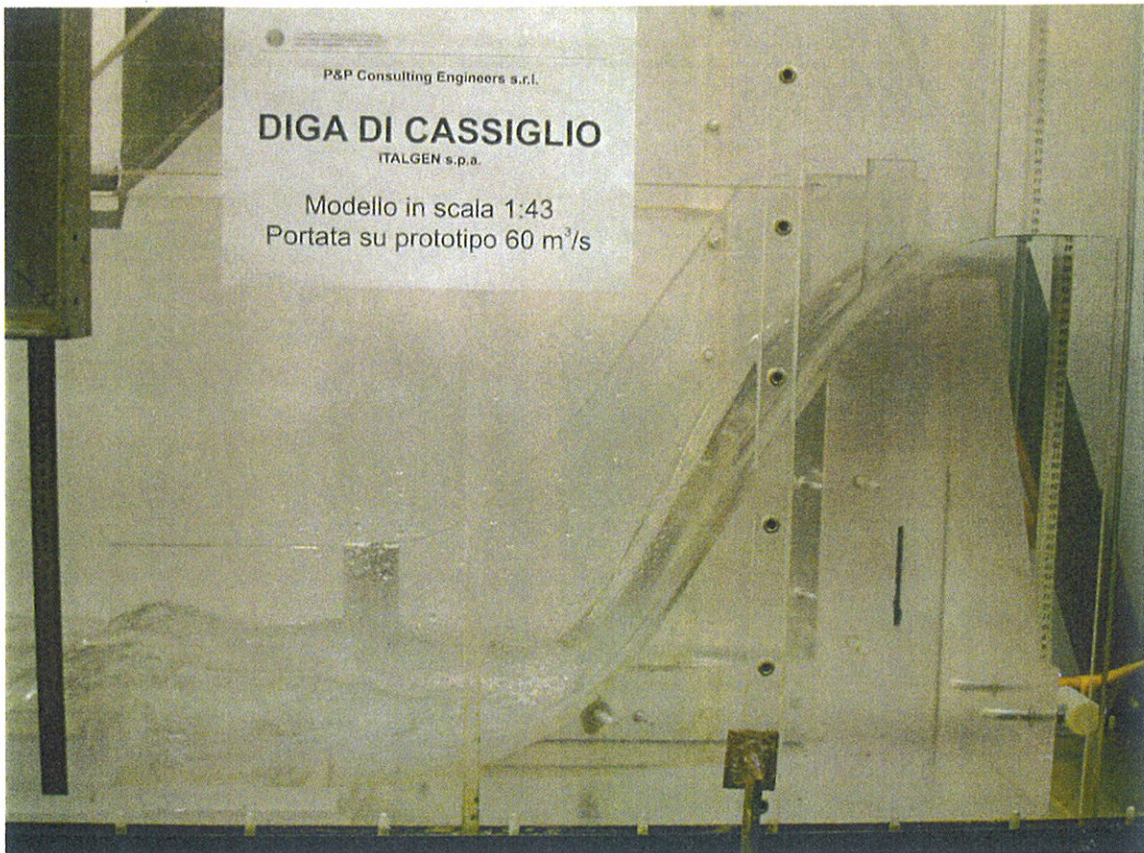


Foto 3: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di 60 m³/s.



Foto 4: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di 110 m³/s.

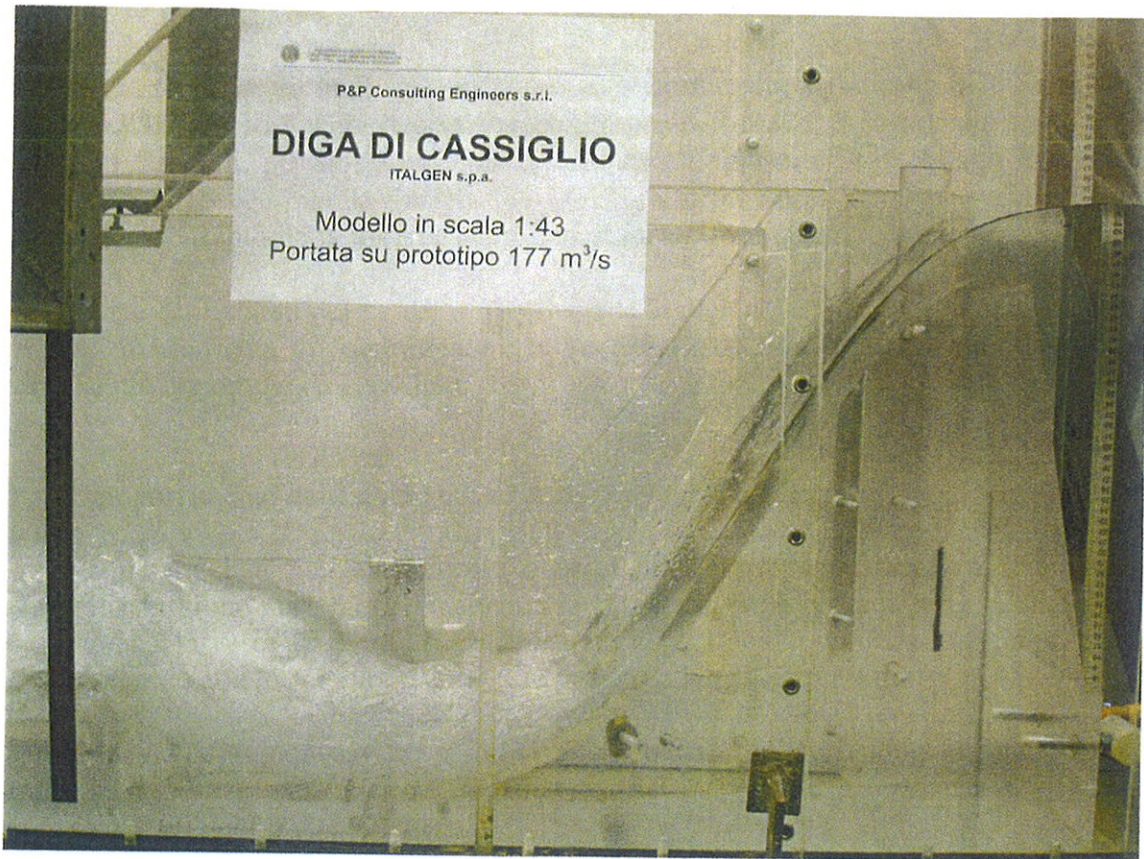


Foto 5: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di $177 \text{ m}^3/\text{s}$.



Foto 6: particolare della vasca di dissipazione (portata su prototipo di $177 \text{ m}^3/\text{s}$).

I risultati testè descritti venivano illustrati al Committente nel corso della visita del 4 novembre 2005 presso il Laboratorio del Dipartimento IMAGE. A tale visita erano presenti l'ing. Aldo Castoldi, per la società P&P Consulting Engineers, l'ing. Marco Pegoraro e il geom. Gildo Giacobbe, per la Società ITALGEN, il prof. Luigi Da Deppo e il prof. Paolo Salandin, Responsabili della Ricerca per il Dipartimento IMAGE.

Presa visione dei risultati del modello riproducente la diga nella sua configurazione originale, a termine di tale visita il Committente e la Società ITALGEN si riservavano di valutare le modifiche più opportune da apportare.

4. Comportamento delle opere nella configurazione modificata.

A seguito dei risultati precedentemente illustrati, il Committente decideva di allungare la vasca di dissipazione mantenendo inalterata la geometria delle restanti parti. Come illustrato nella Tavola 2 la vasca di dissipazione, misurata nel suo sviluppo orizzontale a partire dalla fine del raccordo con lo scivolo, risultava su prototipo lunga circa 30 m.

Le prove su modello, non davano però i risultati sperati, manifestandosi ancora, per i valori più alti della portata, una qualche insufficienza del dispositivo a contenere il risalto per i valori più elevati della portata.

Si decideva quindi di comune accordo con il Committente, che in data 27 marzo 2006 aveva preso visione di tale risultato, di modificare ulteriormente la conformazione della vasca di dissipazione, cambiando la forma del gradino posto al fondo della vasca.

Tale conformazione geometrica illustrata nella Tavola 3 (posizione "A"), veniva rapidamente approntata e verificata alla presenza dell'ing. Castoldi e dell'ing. Pegoraro durante la visita del 4 aprile 2006.

Al di là di un ulteriore modesto allungamento della vasca di dissipazione che è risultata di circa 34 m di sviluppo orizzontale, veniva completamente modificata la conformazione del gradino terminale che risultava sagomato come soglia piana a forma trapezia con sviluppo planimetrico di circa 3,6 m e con sommità a quota 311,10 m s.m.m.

Le Foto 7 ed 8 mostrano il modello modificato inserito nella canaletta in plexiglas.

Come si può osservare dai risultati delle prove su modello illustrati nelle Foto 9, 10 e 11 rispettivamente per le portate di 60, 110 e 177 m³/s, le modifiche risultavano decisive per il buon funzionamento delle opere, garantendo in ogni caso il contenimento del risalto nella vasca.

MODIFICA 1
 Scala disegno 1:200
 sul reale
 Scala modello 1:43

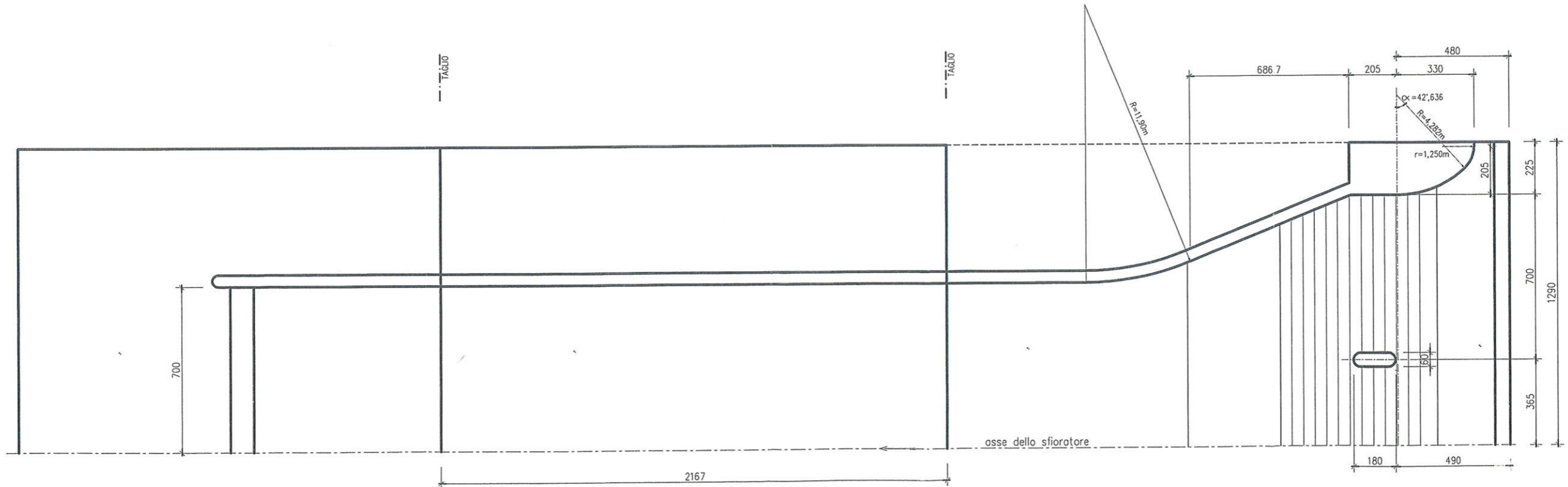
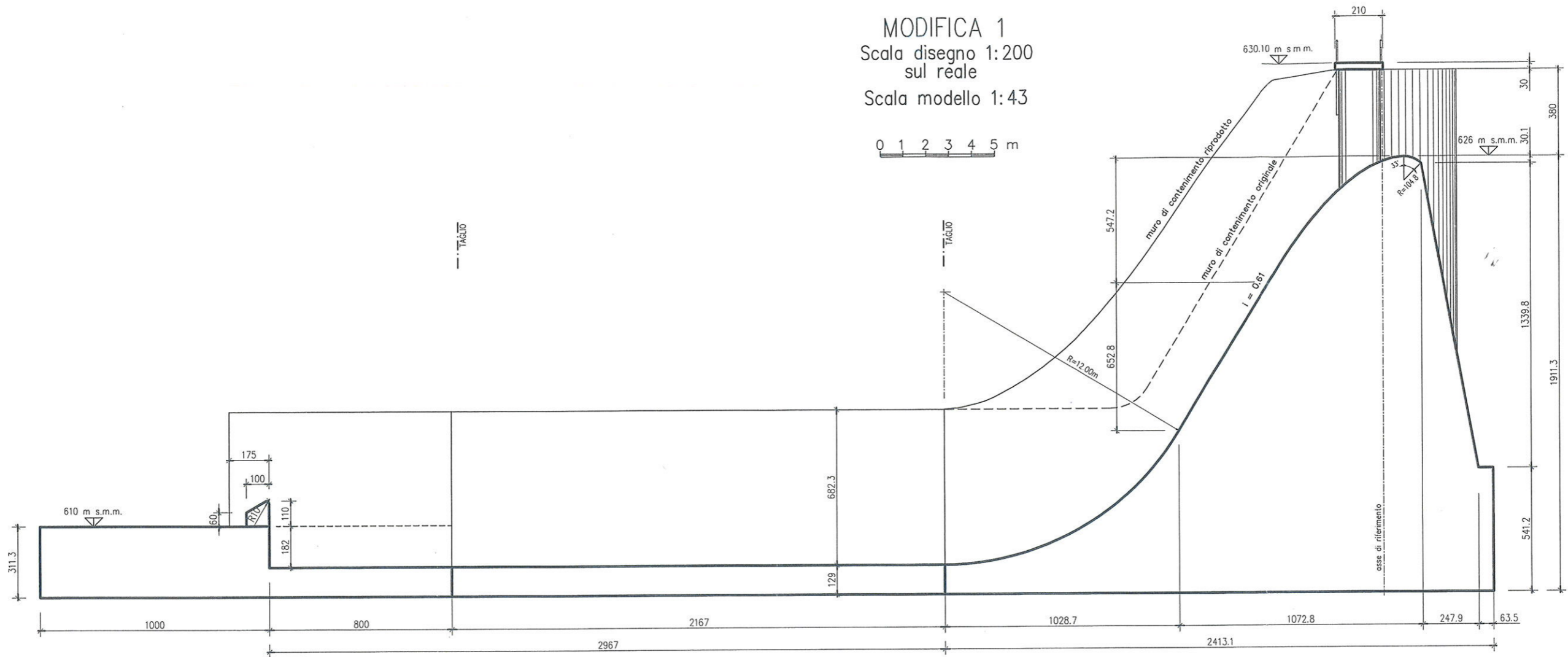


Tavola 2: pianta e sezione del modello nella prima configurazione modificata.

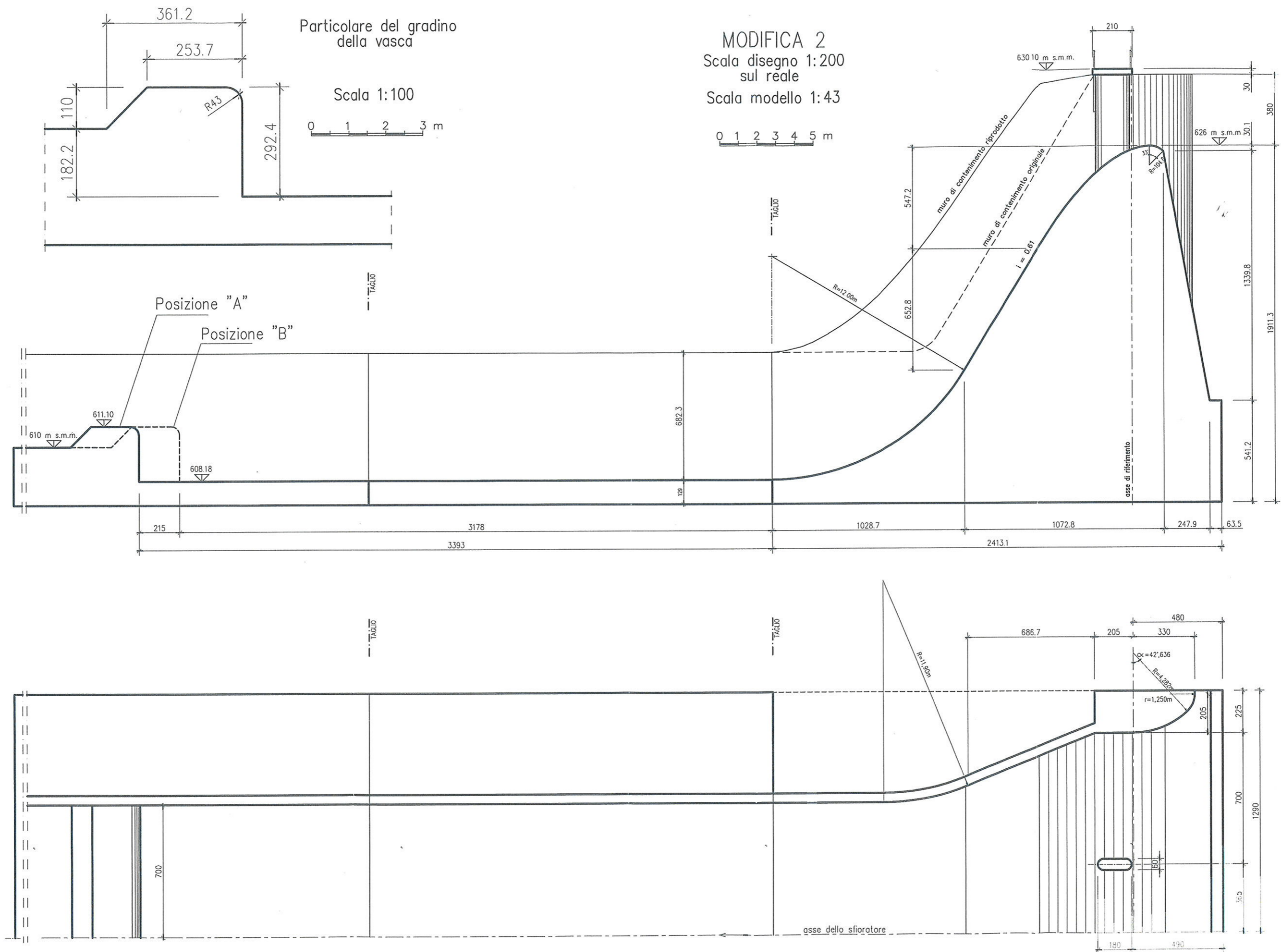


Tavola 3: pianta e sezione del modello nella seconda configurazione modificata.

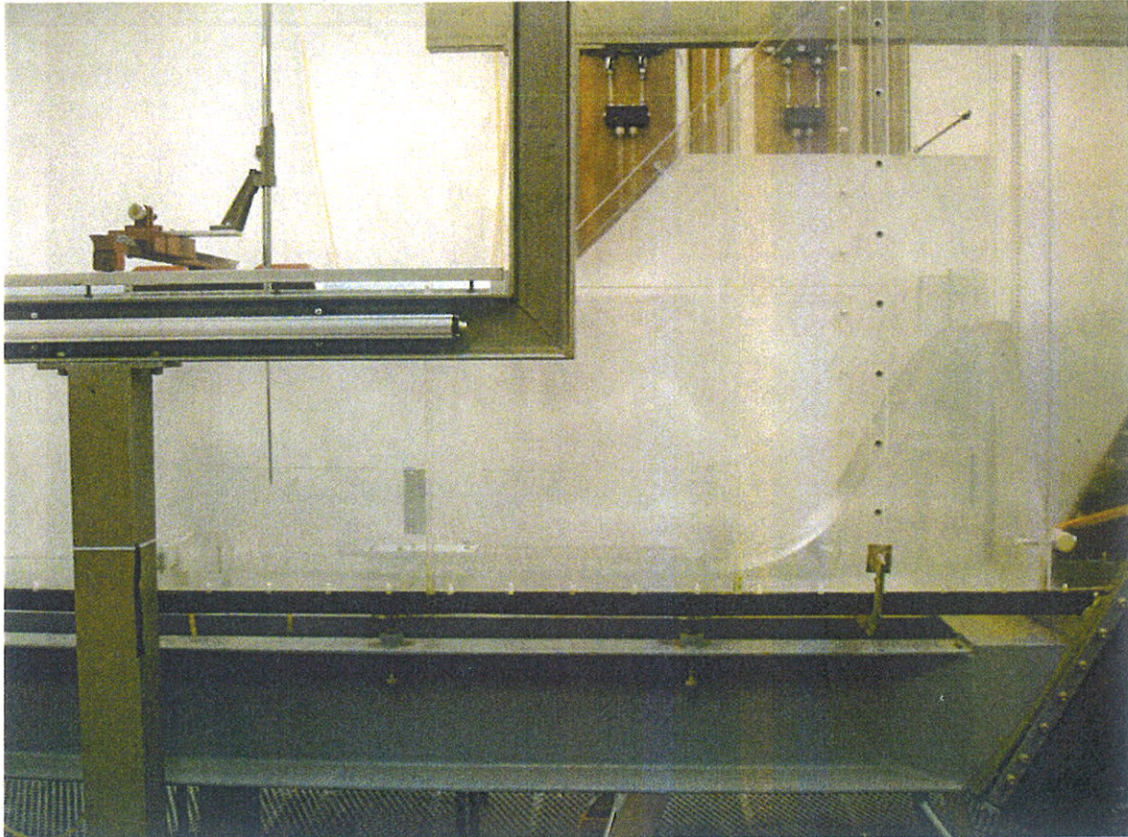


Foto 7: veduta laterale del modello nella seconda configurazione modificata.



Foto 8: veduta da valle del modello nella seconda configurazione modificata.

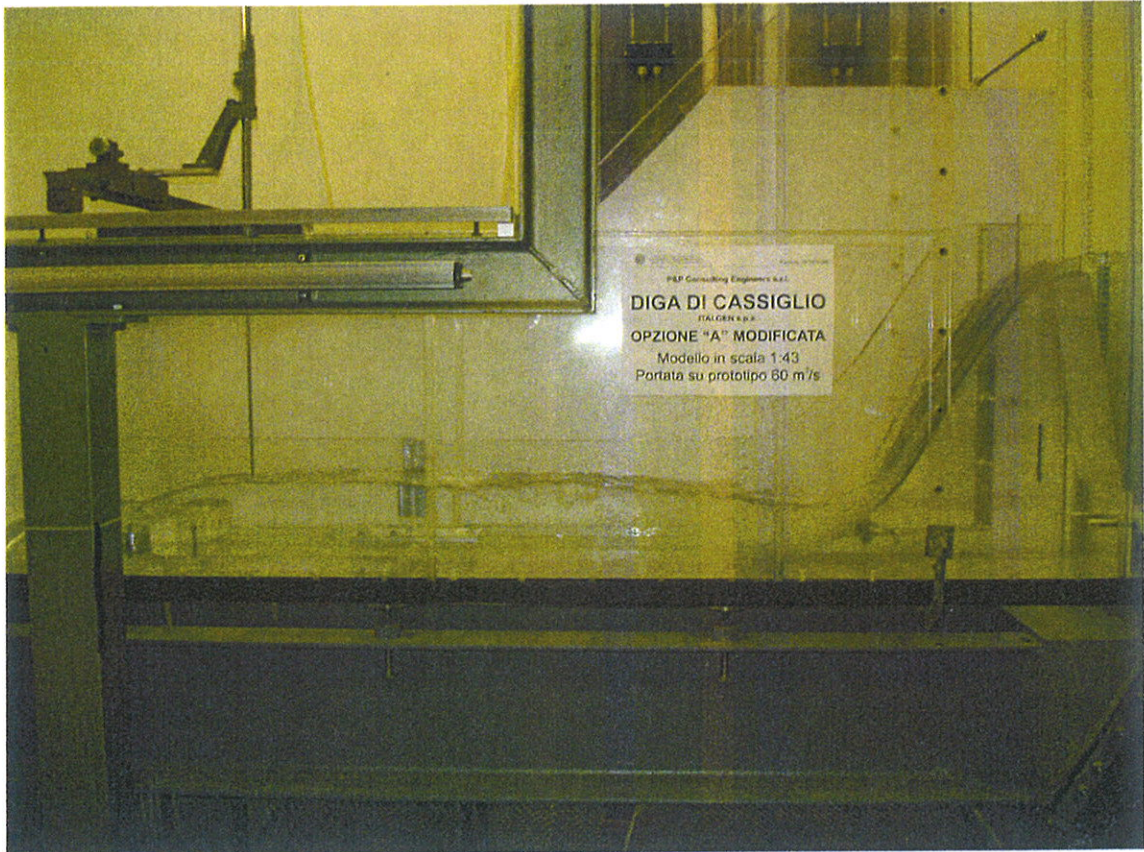


Foto 9: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di 60 m³/s.

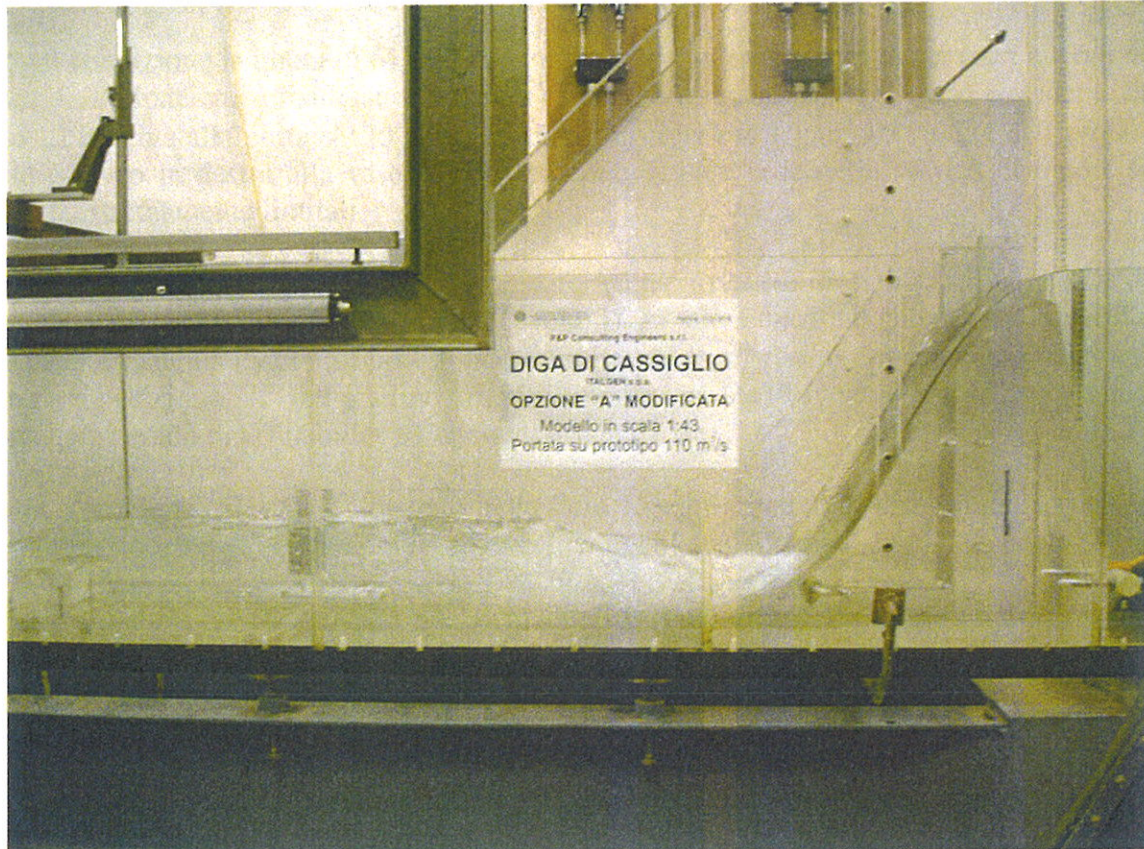


Foto 10: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di 110 m³/s.

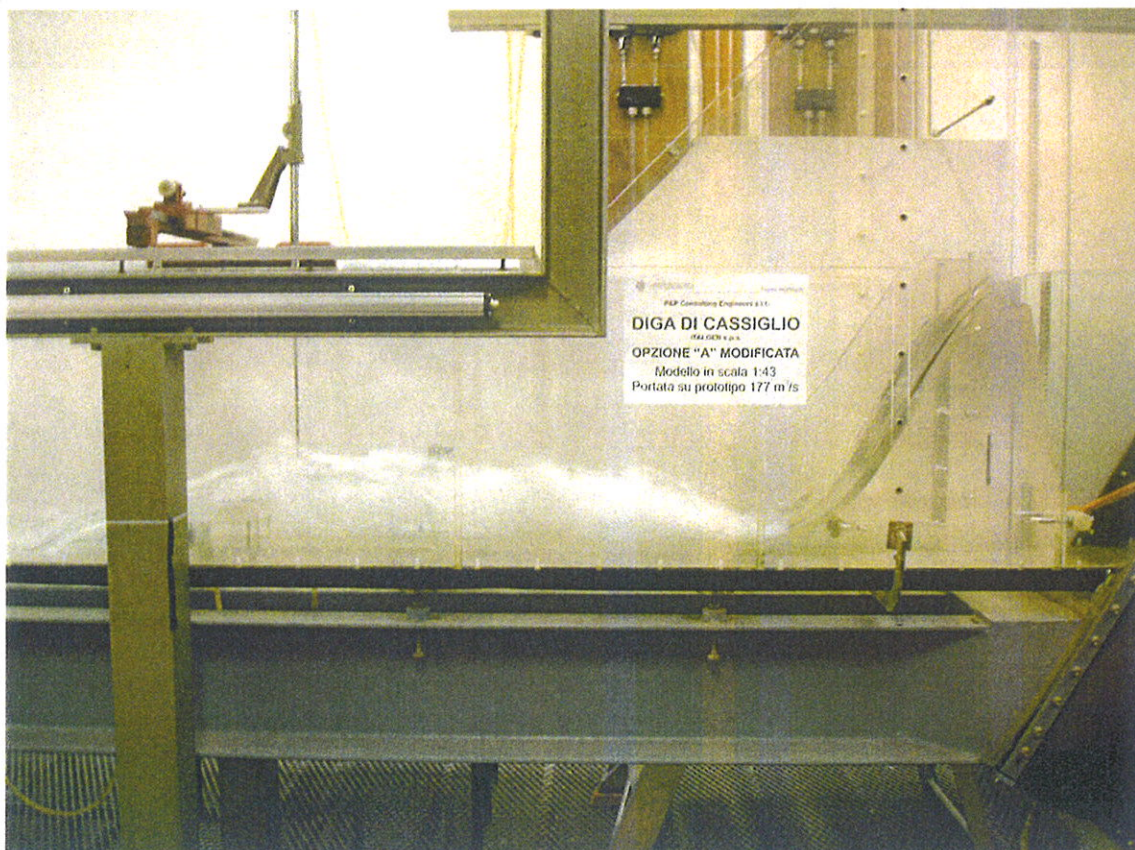


Foto 11: veduta laterale del modello in funzione con una portata su prototipo di 177 m³/s.

In ogni condizione la quota di 615,00 m s.m.m. prevista per la sommità dei muri laterali della vasca di dissipazione è risultata adeguata a contenere il risalto. Inoltre, come è evidente dalla Foto 12 relativa alla portata 170 m³/s, gli effetti di rigurgito legati alla risalita dell'acqua nel tratto d'alveo in destra alla vasca di dissipazione, attuale sede dello scarico di fondo, sono risultati estremamente limitati.

Al fine di ottimizzare il risultato, si è provato anche a ridurre di 2,15 m la lunghezza della vasca (posizione "B" del gradino nella Tavola 3). In tale situazione geometrica la portata di 170 m³/s è risultata essere proprio il valore limite per cui il risalto era contenuto nella vasca, mentre la posizione "A" del gradino originariamente provata (Tavola 3), garantiva certamente un maggior grado di affidabilità all'opera di dissipazione.

L'unico problema rilevato è illustrato nella Foto 13 ed è relativo ai disturbi della vena sullo scivolo provocati dall'attacco del muro di contenimento e dalla pila.

Mentre i disturbi dovuti alla pila non richiedono particolari interventi, al fine di contenere il sopralzo in corrispondenza dei muri laterali, gli stessi dovranno essere sopraelevati rispetto quanto previsto in progetto.

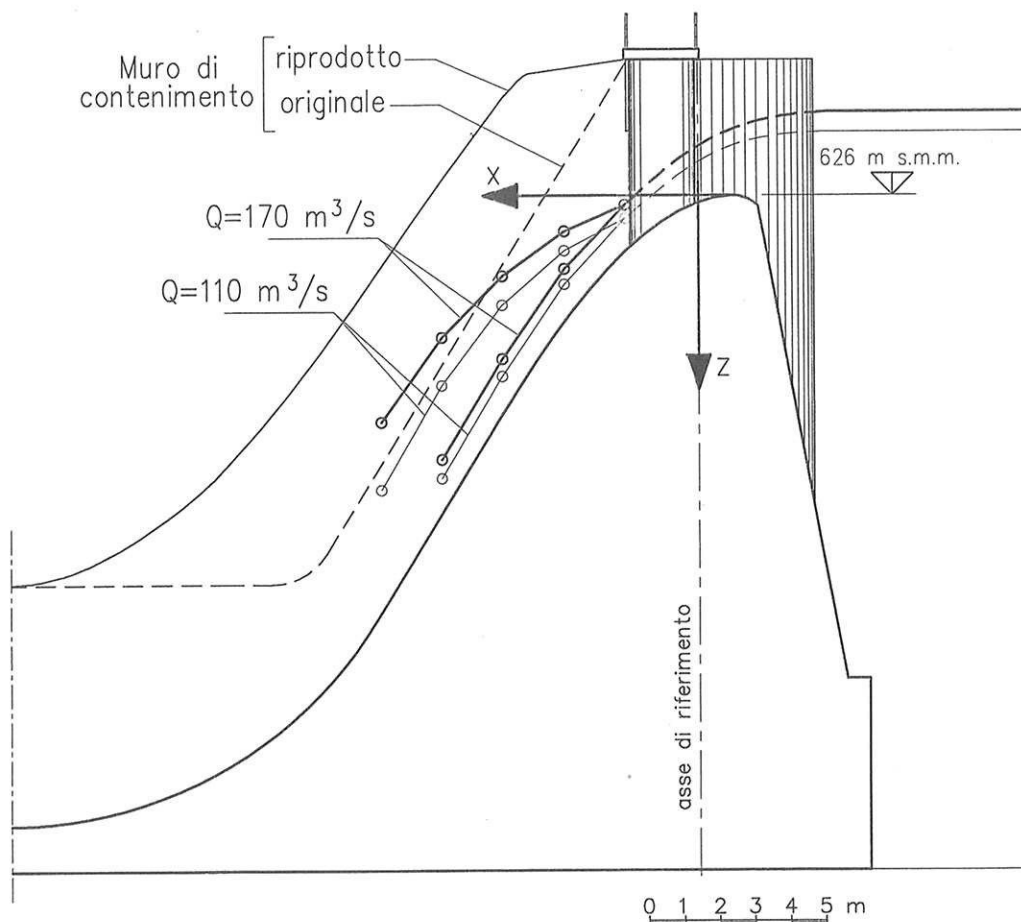
A tale scopo in Figura 3 sono riportate le massime altezze misurate dei profili liquidi in corrispondenza al muro per le portate di 110 e 170 m³/s messi a confronto con le quote "indisturbate" rilevate sullo scivolo. Rispetto a queste è da assumersi un franco adeguato.



Foto 12: veduta da valle del modello in funzione con una portata su prototipo di 170 m³/s.



Foto 13: particolare dei disturbi della vena sullo scivolo provocati dall'attacco del muro di contenimento e dalla pila per una portata su prototipo di 177 m³/s.



Quote z della superficie libera in cm

Q (m ³ /s)	x ₁ =205 (cm)	x ₂ =377 (cm)	x ₃ =549 (cm)	x ₄ =721 (cm)	x ₅ =893 (cm)	
110	z ₁ =65	z ₂ =156	z ₃ =309	z ₄ =535	z ₅ =832	a ridosso del muro
170	z ₁ =26	z ₂ =101	z ₃ =227	z ₄ =400	z ₅ =639	
110	z ₁ =65	z ₂ =250	z ₃ =510	z ₄ =800	X	in condizione indisturbata
170	z ₁ =26	z ₂ =206	z ₃ =461	z ₄ =745	X	

Figura 3: rilievo del profilo della vena sullo scivolo a ridosso del muro e in condizione indisturbata per le portate su prototipo di 110 e 170 m³/s.

In data 8 maggio 2006, il buon funzionamento delle opere, nella seconda configurazione modificata (posizione "A" del gradino nella Tavola 3), è stato illustrato al Dirigente dell'Ufficio Periferico del Registro Italiano Dighe di Milano, dott. ing. Vittorio Maugliani durante la visita compiuta a tale scopo presso il Laboratorio del Dipartimento IMAGE

5. Conclusioni.

E' stato esaminato su modello idraulico in scala 1:43 il comportamento delle opere di sfioro e dissipazione relativamente alla diga di Cassiglio (BG).

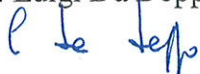
Al fine di ottenere un soddisfacente comportamento generale delle opere si sono dovute operare modifiche alla vasca di dissipazione, al gradino terminale posto al termine della stessa ed ai muri di contenimento laterali del profilo sfiorante.

Con la geometria illustrata in Tavola 3 – gradino in posizione “A”, le opere sono risultate adeguate al corretto smaltimento della portata di progetto ed è garantita l'efficacia del processo dissipativo.

Padova, 27 luglio 2006

I Responsabili della Ricerca

Prof. Ing. Luigi Da Deppo



Prof. Ing. Paolo Salandin



Il Direttore del Dipartimento

Prof. Paolo Previatello



APPENDICE

Supporto CD con filmato relativo al funzionamento delle opere nella seconda configurazione modificata – Posizione “A” per la portata $Q = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ su reale.