

DIGA DI CEPPO MORELLI

PROGETTO DI ADEGUAMENTO

PROGETTO DEFINITIVO - Rev. 1

RELAZIONE SULLA MODELLAZIONE IDRAULICA



EDISON S.p.A.

**DIGA DI CEPPO MORELLI
PROGETTO DI ADEGUAMENTO**

MODELLAZIONE FISICA
- MODELLO IN SCALA 1:40 -

Novembre 2009

Direttori Tecnici: Prof. Ing. A. Adami

Dott. Ing. G. Comola

Collaboratore: Dott. Ing. E. Dallan

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. ALLESTIMENTO DEL MODELLO FISICO DELLO SCARICO DI SUPERFICIE DELLA DIGA DI CEPPLO MORELLI	9
2.1. GENERALITÀ	9
2.2. DATI DI BASE DEL MODELLO DELLO SCARICO DI SUPERFICIE	13
2.3. MODALITÀ COSTRUTTIVE	20
2.4. VERIFICA GEOMETRICA DELLA MODELLAZIONE	30
3. ALLESTIMENTO DELLA STRUMENTAZIONE ACCESSORIA E DI MISURA	31
3.1. MISURA DELLA PORTATA	31
3.2. MISURA DEI LIVELLI	33
3.3. MISURA DELLA PRESSIONE LUNGO LO SFIORATORE IN CORPO DIGA.....	37
3.4. MISURA DELLA PRESSIONE SUL MURO DI DESTRA	39
4. TIPOLOGIA DI PROVE ESEGUITE SUL MODELLO FISICO	42
4.1. GENERALITÀ	42
4.2. PROVA CON MASSIMO INVASO	42
4.3. PROVA CON PORTATA 1020 M ³ /S.....	43
4.4. SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO IN CORPO DIGA	44
5. RISULTATI DELLE PROVE ESEGUITE SUL MODELLO FISICO	46
5.1. GENERALITÀ	46
5.2. PROVA CON MASSIMO INVASO	46
5.3. PROVA CON PORTATA 1020 M ³ /S.....	47
5.3.1. <i>Battenti idrici</i>	47
5.3.2. <i>Pressioni</i>	55
5.1. SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO IN CORPO DIGA	60
5.1.1. <i>Quota di invaso 784.50 m s.m.m.</i>	61
5.1.2. <i>Quota di invaso 784.00 m s.m.m.</i>	69
5.1.3. <i>Quota di invaso 783.00 m s.m.m.</i>	76
5.1.4. <i>Quota di invaso 782.00 m s.m.m.</i>	83
5.1.5. <i>Quota di invaso 781.00 m s.m.m.</i>	88

5.1.6. *Sintesi dei dati rilevati nelle prove per la determinazione della scala delle portate*
91

6. CONCLUSIONI..... 96

1. INTRODUZIONE

Con lettera d'ordine in data 11 Maggio 2007, la società EDISON S.p.A. ha incaricato la società Protecno S.r.l. di Noventa Padovana (PD) di allestire il *Modello Idraulico della diga di Ceppo Morelli*. Il modello è stato allestito presso il Centro Sperimentale per Modelli Idraulici di Voltabarozzo (Padova) gestito dal Magistrato alle Acque di Venezia.

La diga di Ceppo Morelli è una diga a volta a doppia curvatura non tracimabile alta 46 m con uno sviluppo del coronamento di 36.5 m, costruita negli anni 1929 e 1930. Il piano di coronamento è a quota 784.00 m s.m.m.; lo spessore dell'arco al coronamento è di 1 m. Il paramento di valle è in calcestruzzo a vista mentre quello di monte è rivestito con gunite retinata.

Il trasporto solido del Torrente Anza, depositatosi nell'invaso, ha causato già nel 1939 l'interrimento dello scarico di fondo e la pressochè completa colmatazione dell'invaso.

La diga non tracimabile è munita di tre opere di scarico: uno di fondo, fuori esercizio, uno intermedio, costituito da due luci con soglia a quota 770.00 m s.m.m., ed uno di superficie con ciglio a quota 780.75 m s.m.m. Un canale a valle dello sfioratore raccoglie le acque e le convoglia nel letto del torrente Anza.

La recente rivalutazione idrologica del bacino sotteso dallo sbarramento ha portato alla definizione di un'onda di piena con tempo di ritorno 1000 anni avente una portata al colmo di 1187 m³/s.

Data l'assenza di capacità di laminazione del serbatoio, le opere di scarico devono essere in grado di evacuare questa portata; a fronte della loro attuale insufficienza Edison S.p.A., Concessionaria della diga, ha incaricato la Ing. Claudio Marcello S.r.l. di redigere un progetto di adeguamento della diga alla nuova portata di progetto.

Il progetto “Diga di Ceppo Morelli – Adeguamento dello scarico di superficie”, datato dicembre 2005, prevedeva, per aumentare la capacità di scarico dello sbarramento, l’innalzamento della quota di massimo invaso a 784.50 m s.m.m., la realizzazione di un nuovo scarico di superficie di “emergenza” ubicato a valle di quello esistente e l’innalzamento del piano di coronamento della diga a 785.50 m s.m.m.

È già stata consegnata ad EDISON a Dicembre 2007 la relazione conclusiva delle attività di misura delle caratteristiche del deflusso dello scarico di superficie secondo le specifiche indicate dal Committente. In particolare nel modello sono state riprodotte due configurazioni delle opere in progetto, denominate Configurazione I e Configurazione II.

Nello specifico, il modello fisico dello scarico di superficie della diga di Ceppo Morelli è stato realizzato secondo il principio di similitudine di Froude, con fattore di riduzione geometrica λ pari a 40, e rappresentava, a fondo fisso, parte dell’invaso a monte della diga, la diga e lo scarico di superficie, e un tratto di alveo di circa 130 m a valle della diga.

Successivamente, Edison ha richiesto la verifica su modello di una nuova configurazione delle opere di scarico (Configurazione III). Il modello fisico è stato perciò adeguato secondo le nuove specifiche comunicate dal Committente. In particolare, rispetto allo stato attuale, la Configurazione III prevedeva:

- l’innalzamento della quota di invaso a 784.50 m s.m.m. (come progetto 2005)
- l’innalzamento del piano di coronamento a quota 785.50 m s.m.m. (come progetto 2005)
- l’innalzamento del muro di valle del canale nuovo, portandone la sommità alla quota costante di 785.00 m s.m.m.

- l'abolizione delle pile di sostegno della passerella, provvedimento utile soprattutto per non ostacolare l'evacuazione di corpi flottanti sullo sfioratore

La relazione conclusiva delle attività realizzate in questa configurazione è stata consegnata ad Edison ad Agosto 2008.

Il risultato dei precedenti studi su modello fisico ha indotto la Committente a modificare il precedente progetto per l'adeguamento degli scarichi della diga di Ceppo Morelli. L'attuale progetto prevede il rinforzo dell'esistente struttura ad arco mediante una nuova struttura ad arco gravità da realizzare a valle e a contatto con l'esistente.

La portata di piena rivalutata (1187 m³/s) sarà scaricata da:

- esistente scarico di superficie con muro di valle sopraelevato (come Configurazione III)
- esistente scarico di alleggerimento
- nuovo scarico di superficie previsto nel corpo diga della nuova struttura

La presente relazione riguarda la modifica dell'attuale modello fisico per adeguarlo al nuovo progetto e le prove eseguite in questa configurazione.

Lo scopo della modellazione è di verificare che i due scarichi di superficie siano in grado di scaricare complessivamente la portata di 1020 m³/s con una quota nel serbatoio non superiore alla quota di massimo invaso autorizzata (784.50 m s.m.m.), ipotizzando che lo scarico intermedio scarichi 167 m³/s.

Come indicato nella Specifica Tecnica, è stata riprodotta su modello fisico la nuova struttura ad arco-gravità e in particolare lo scarico di superficie previsto in corpo diga; lo scarico di superficie lungo il canale esistente si trovava già in Configurazione III. Non sono stati modellati il nuovo scarico di fondo in corpo diga e l'esistente scarico di alleggerimento.

Per riprodurre correttamente l'andamento delle linee di corrente nei pressi del nuovo sfioratore in corpo diga, influenzate dalla morfologia dei versanti ivi

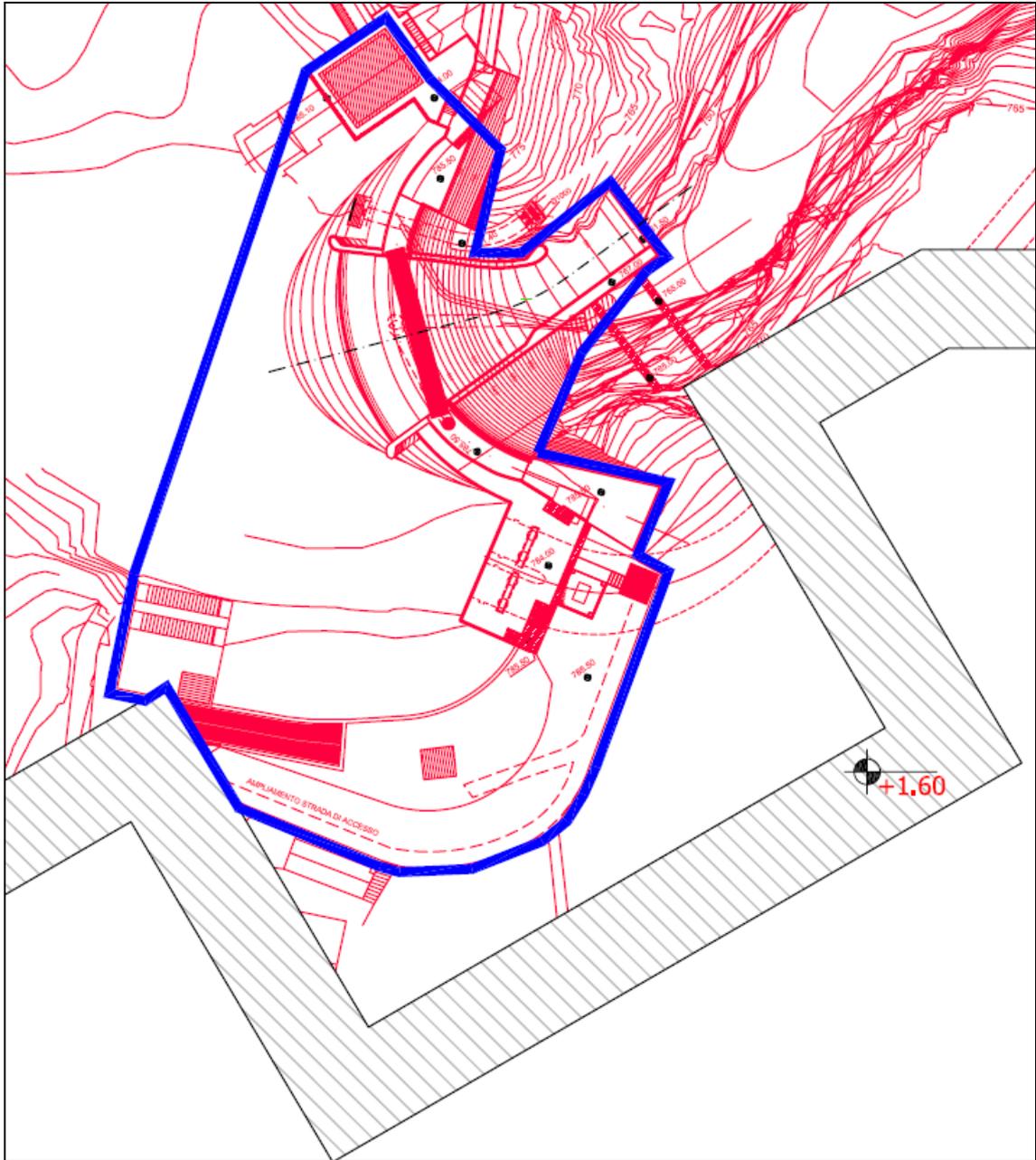


Figura 3 - Nuova configurazione della diga di Ceppo Morelli, con indicata l'area oggetto di nuova modellazione.

2. ALLESTIMENTO DEL MODELLO FISICO DELLO SCARICO DI SUPERFICIE DELLA DIGA DI CEPPO MORELLI

2.1. GENERALITÀ

Il modello fisico in questione è ubicato presso il Centro Sperimentale per Modelli Idraulici di Voltabarozzo, all'interno del capannone che ospita il modello generale della laguna di Venezia, in un'area destinata ed attrezzata per i modelli di tipo fluviale. La localizzazione del modello (Figura 4) appare la più idonea essendo presenti tutte le attrezzature elettromeccaniche ed idrauliche necessarie al suo funzionamento.

Il modello fisico dell'opera è stato realizzato in scala di riduzione geometrica 1:40 e nel rispetto del criterio di similitudine di Froude, secondo il quale nel modello e nel prototipo viene rappresentato in maniera inalterata il rapporto tra la forza d'inerzia del fluido e la forza gravitazionale, cioè il numero di Froude della corrente.

La scala di riduzione delle principali grandezze fisiche, fissata la scala di riduzione geometrica λ , 1:40 nel caso in questione, risulta quindi imponendo l'uguaglianza dei numeri di Froude (Fr) propri del modello e del prototipo (cioè il

reale):
$$\frac{Fr_m}{Fr_p} = 1 \text{ ovvero } \frac{v_m}{\sqrt{g l_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g l_p}}$$

dove:

- v rappresenta la velocità scala;
- l rappresenta la lunghezza scala, cioè la profondità dell'acqua;
- g è l'accelerazione di gravità;
- i pedici m e p riferiscono, rispettivamente, al modello ed al prototipo.

Ne risulta che i rapporti di scala delle principali grandezze fisiche in gioco sono i seguenti:

<i>Grandezza fisica</i>	<i>Rapporto di scala (modello:prototipo)</i>	
Lunghezza	λ	1 : 40
Velocità	$\lambda^{0.5}$	1 : 6.32
Tempo	$\lambda^{0.5}$	1 : 6.32
Portata volumetrica	$\lambda^{2.5}$	1 : 10119.29
Scabrezza	$\lambda^{-1/6}$	1 : 0.54

Tabella 1 – Criterio di similitudine di Froude. Rapporti di scala per le principali grandezze fisiche in gioco.

A riguardo della scala di riduzione per la scabrezza, si sottolinea che la relazione indicata in Tabella è stata ricavata con riferimento alla formula di Gauckler-Strickler, largamente usata nel campo dell'ingegneria fluviale. Si fa comunque presente che nel modello fisico dovranno essere analizzati fenomeni localizzati per i quali la scabrezza delle pareti è in ogni caso poco influente.

Sulla base del materiale a nostra disposizione, fornitoci dalla Committente, si è supposto per lo scarico di superficie in corpo diga un coefficiente di scabrezza per il prototipo di 60-70 m^{1/3}/s. Nei modelli in similitudine di Froude la scabrezza delle pareti deve essere minore che nel reale; in particolare, facendo riferimento al coefficiente di Strickler ed essendo λ la scala prescelta, il rapporto di riduzione risulta pari a:

$$r_K = \lambda^{-1/6}.$$

Per il modello si ottengono così valori di Ks superiori a 100 m^{1/3}/s e la necessità, quindi, di realizzare lo sfioratore con un materiale molto liscio.

Per questo motivo il corpo diga e in particolare il nuovo scarico di superficie sono stati realizzati in malta cementizia fine gettata in opera, lisciata. Per la modellazione sono state utilizzate modine in PVC che riproducono la forma di alcune sezioni della diga ritenute significative (come riportato nelle tavole di

progetto allegate alla relazione 341001R01-1ED “Progetto del modello fisico”, consegnata ad agosto 2008).

La configurazione plano-altimetrica delle opere è stata eseguita sul modello sulla base delle tavole fornite dalla Committente e allegate alla Specifica Tecnica.

Per la modellazione dei versanti rocciosi in spalla destra è stato utilizzato cemento lisciato; i manufatti presenti (opera di presa e imbocco galleria) sono stati rappresentati nei loro ingombri esterni con sagome in PVC.

I versanti a monte e valle della diga e l'esistente scarico di superficie sono già stati modellati nel precedente modello e non sono stati modificati. Lo scarico di superficie è in configurazione con muro di valle rialzato.

2.2. DATI DI BASE DEL MODELLO DELLO SCARICO DI SUPERFICIE

Le informazioni riguardanti le caratteristiche geometriche del manufatto da riprodurre, unitamente al rilievo della valle all'interno della quale è situata la diga, sono state interamente fornite dal Committente.

La diga di Ceppo Morelli è munita di tre opere di scarico (Figura 5): uno di fondo, uno intermedio ed uno di superficie. Lo scarico di fondo, attualmente fuori esercizio, è ubicato sulla sponda sinistra tra lo sfioratore e la spalla della diga. Le acque di scarico sono raccolte da una galleria che attraversa lo sperone roccioso e convogliate lontano dalla diga.

Lo scarico intermedio è ubicato sulla sponda destra della diga ed è costituito da due luci con soglia a quota 770.00 m s.m.m. intercettate da paratoie piane di 3.00 m x 4.00 m; le acque sono scaricate a valle mediante apposita galleria.



Figura 5 – Vista da valle della diga di Ceppo Morelli.

Lo scarico di superficie, riprodotto nel modello fisico, (Figura 6) con ciglio di sfioro a quota 780.75 m s.m.m. è sistemato sullo sperone roccioso in sponda sinistra ed è

costituito da otto luci a soglia libera di larghezza di 10.50 m ciascuna; un canale a valle dello sfioratore raccoglie le acque e le convoglia nel letto del torrente.

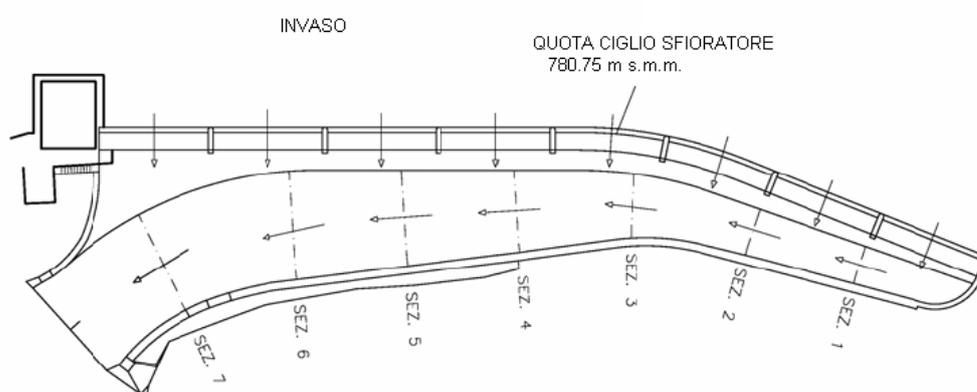


Figura 6 – Configurazione attuale dello scarico di superficie della diga di Ceppo Morelli.

La recente rivalutazione idrologica del bacino sotteso dallo sbarramento ha portato alla definizione di un'onda di piena con tempo di ritorno 1000 anni avente una portata al colmo di $1187 \text{ m}^3/\text{s}$ e ha reso necessario un progetto di adeguamento dello scarico di superficie.

Per aumentare la capacità di scarico dello sbarramento sono previsti degli interventi di adeguamento degli scarichi esistenti. Tre configurazioni di progetto sono state oggetto

di precedenti modellazione e prove, e sono descritte nelle Relazioni già consegnate al Committente.

Come accennato nell'introduzione, è stata richiesta la modellazione fisica di una nuova configurazione nella quale, oltre ad innalzare il piano di coronamento a 785.50 m s.m.m. e il muro di valle del canale esistente a quota 785.00 m s.m.m., si prevede la realizzazione di una struttura ad arco gravità a ridosso della diga esistente e di uno scarico di superficie nel nuovo corpo diga.

Per esigenze costruttive, il muro di valle del canale esistente è stato innalzato oltre la quota 785.00 m s.m.m. e quest'ultima è stata evidenziata con una linea di colore rosso lungo tutto lo sviluppo longitudinale del muro. Sono state aggiunte delle linee di quota in colore nero, a distanza di 1 m una dall'altra, per un rilievo visivo quali-quantitativo dell'andamento del pelo libero nel canale. Le foto di seguito riportate mostrano il modello fisico allestito in Configurazione III.



Figura 7 – Vista dall'invaso di monte delle opere di scarico superficiale in Configurazione III



Figura 8 – Canale di scarico in Configurazione III.



Figura 9 – Particolare del canale di scarico in Configurazione III: sulla sinistra lo sfioratore, sulla destra il muro innalzato con le linee di quota tracciate.

Per poter riprodurre la diga e il versante in spalla destra è stata demolita parte della modellazione precedente e allargata la vasca che contiene il modello. È stata riprodotta la nuova struttura ad arco gravità, compreso lo scarico di superficie in essa realizzato e lo scivolo a valle dello stesso, secondo i disegni di progetto trasmessi dal Committente.

La conformazione dei muri di destra e sinistra dello scarico in corpo diga rispetta le ultime indicazioni fornite dal Committente (come da disegni di progetto da Figura 10 a Figura 14).

Il muro di destra dello scivolo in corpo diga è stato innalzato oltre la quota di sommità prevista in progetto per meglio rilevare il profilo idrico sullo stesso.

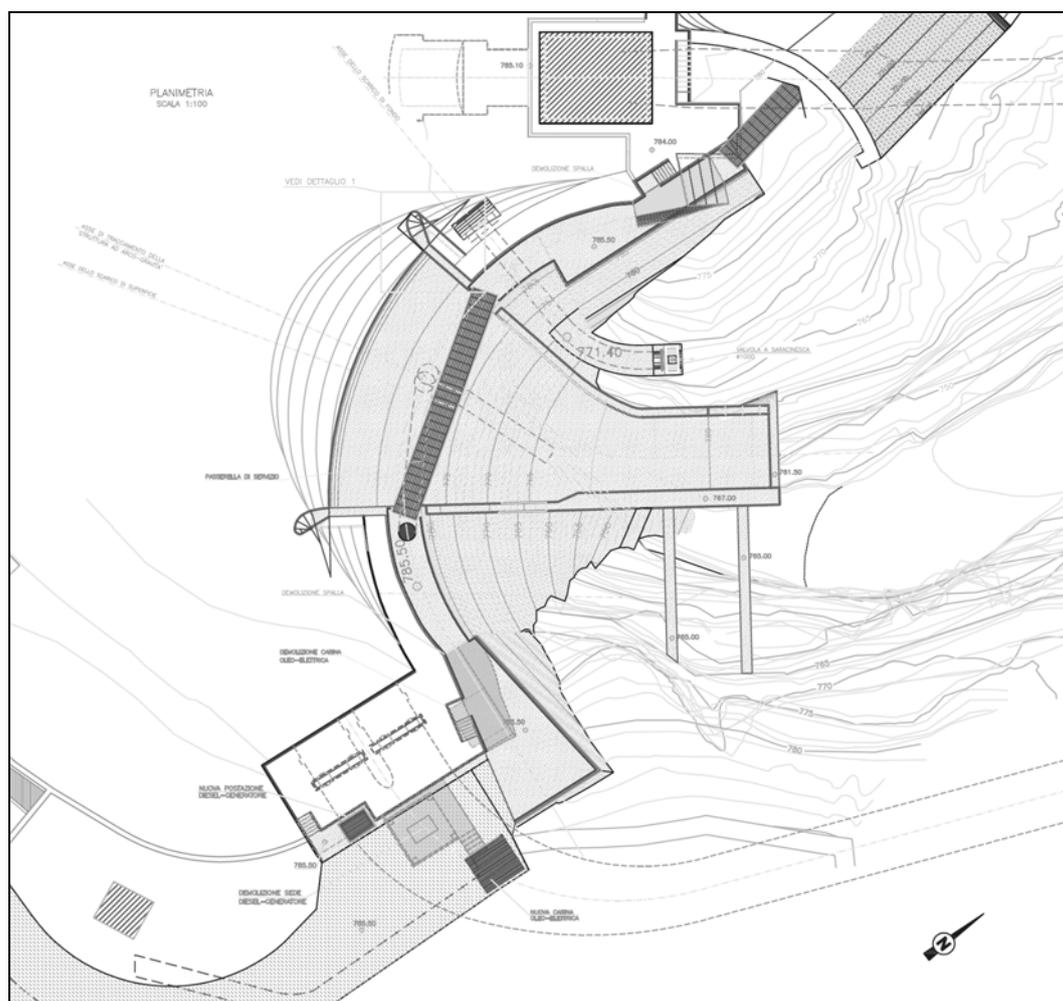


Figura 10 - Planimetria nuove opere in progetto.

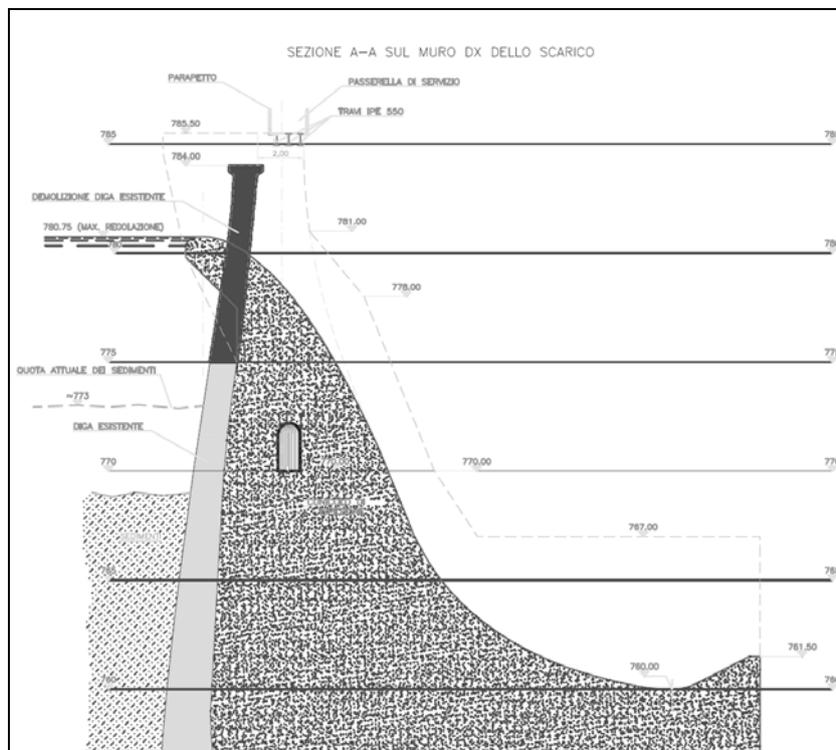


Figura 11 - Sezione A-A sul muro di destra dello scarico in corpo diga

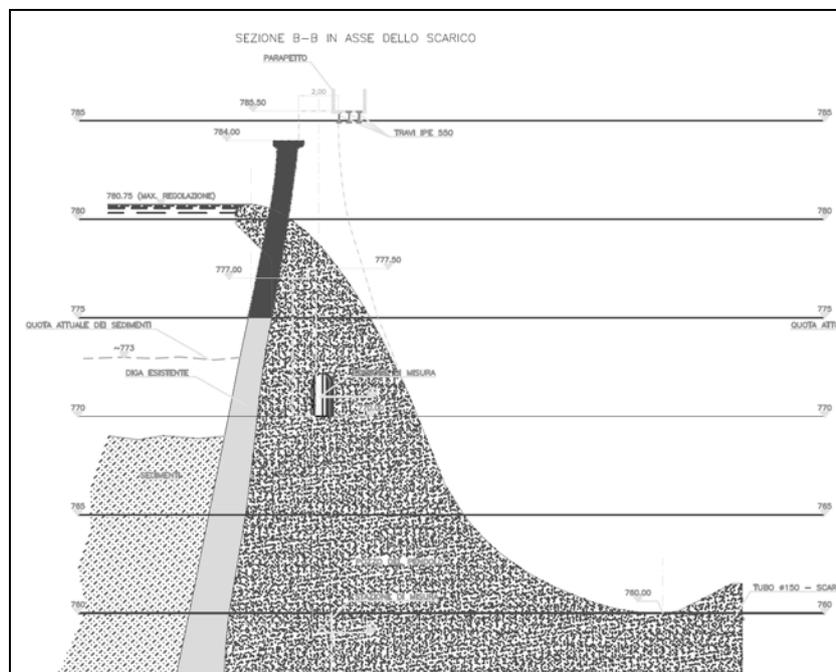


Figura 12 - Sezione B-B in asse allo scarico in corpo diga

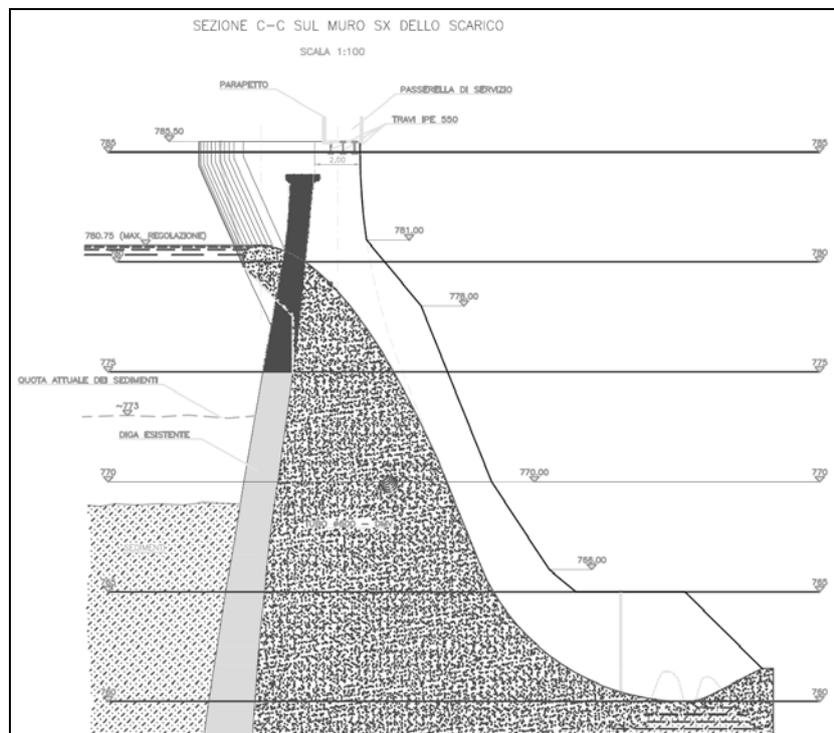


Figura 13 - Sezione C-C sul muro di sinistra dello scarico in corpo diga

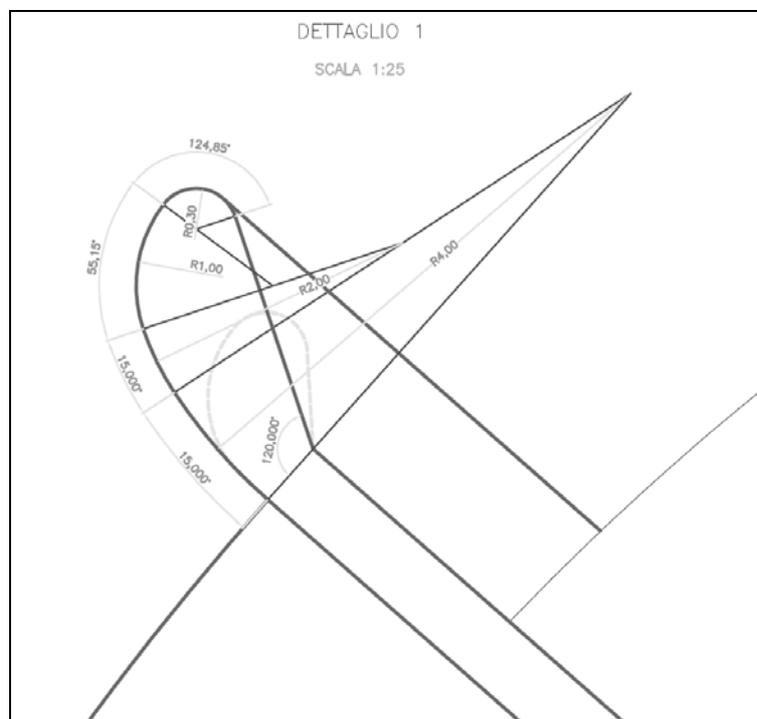


Figura 14 - Particolare dell'estremità verso monte dei muri laterali dello sfioratore in corpo diga

Nel complesso il modello, realizzato a fondo fisso, rappresenta :

- parte dell'invaso a monte della diga e del torrente Anza a valle della diga (secondo le quote già ricostruite sul precedente modello fisico);
- invaso a monte adiacente alla spalla destra della diga;
- i paramenti di monte e di valle della nuova struttura ad arco-gravità;
- lo scarico di superficie in corpo diga;
- lo scarico di superficie in configurazione con il muro di valle rialzato (già realizzato nel precedente modello fisico).

2.3. MODALITÀ COSTRUTTIVE

Il modello generale della diga di Ceppo Morelli è stato realizzato in scala geometrica non distorta pari a 1:40.

Il precedente modello era stato realizzato all'interno di una vasca in muratura appositamente costruita, suddivisa sostanzialmente in tre settori (Figura 15): vasca di carico del modello, area modellata, opere di scarico del modello.

La configurazione III del canale esistente riprodotta nel precedente modello è conforme a quanto riportato nel nuovo progetto, perciò per quest'opera non è stato necessario apportare modifiche al modello fisico. Il paramento della diga invece era stato realizzato in lamiera metallica, piegata in modo da riprodurre la curvatura e posizionata in modo che la quota di sfioro corrispondesse a quella del coronamento della diga, 785.50 m s.m.m. Tra la diga e lo scarico di superficie era stato inserito un parallelepipedo in PVC che riproduceva l'ingombro dell'edificio di manovra dello scarico di fondo.

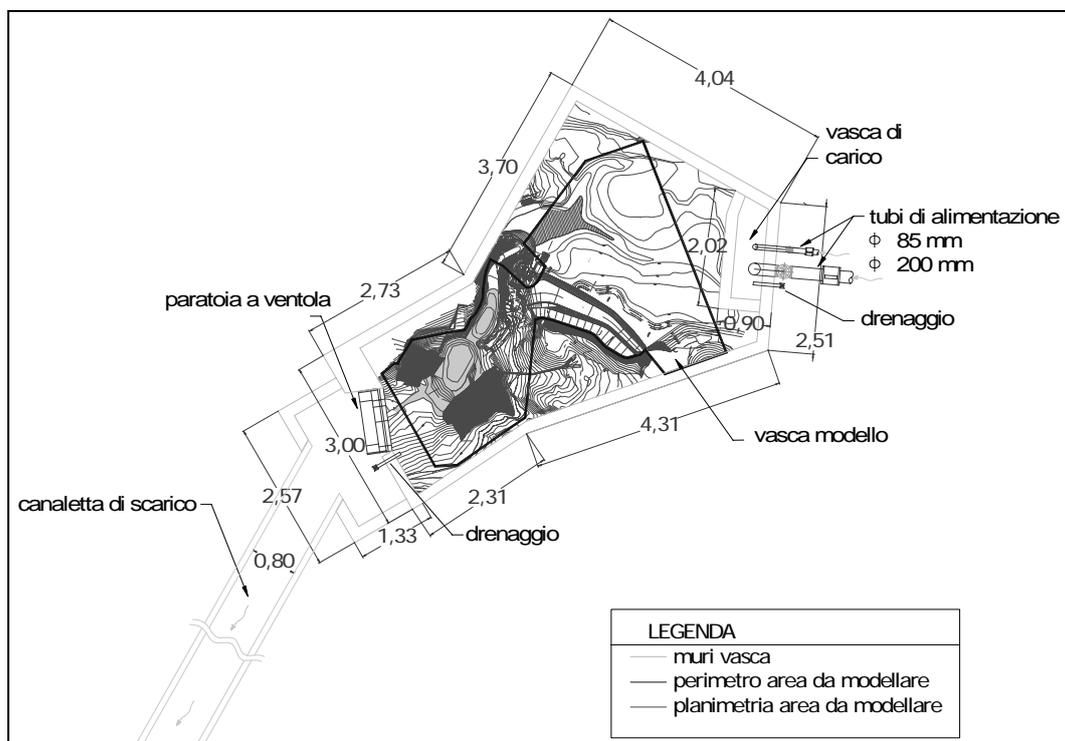


Figura 15 - Planimetria della vasca realizzata per contenere il precedente modello

Poiché il nuovo progetto prevede modifiche al corpo diga e la realizzazione in esso di uno sfioratore, si è dovuta demolire la zona corrispondente alla diga per poter ricostruire l'opera conformemente a quanto riportato nelle tavole di progetto. Per riprodurre correttamente l'andamento delle linee di corrente nei pressi del nuovo sfioratore in corpo diga, influenzate dalla morfologia dei versanti ivi presenti, è stata modellata anche la zona adiacente alla spalla destra della diga, non compresa nella precedente modellazione. Si è resa necessaria la demolizione e l'allargamento di parte del muro perimetrale della vasca di contenimento del modello per poter ospitare la modellazione di questo versante.



Figura 16 - Demolizioni sul precedente modello



Figura 17 - Allargamento del perimetro della precedente vasca di contenimento del modello

Per la modellazione della diga sono state ricavate dai disegni di progetto Edison alcune sezioni della struttura, ritenute significative per la corretta riproduzione della stessa su modello, sulla base delle quali sono state realizzate modine in PVC.

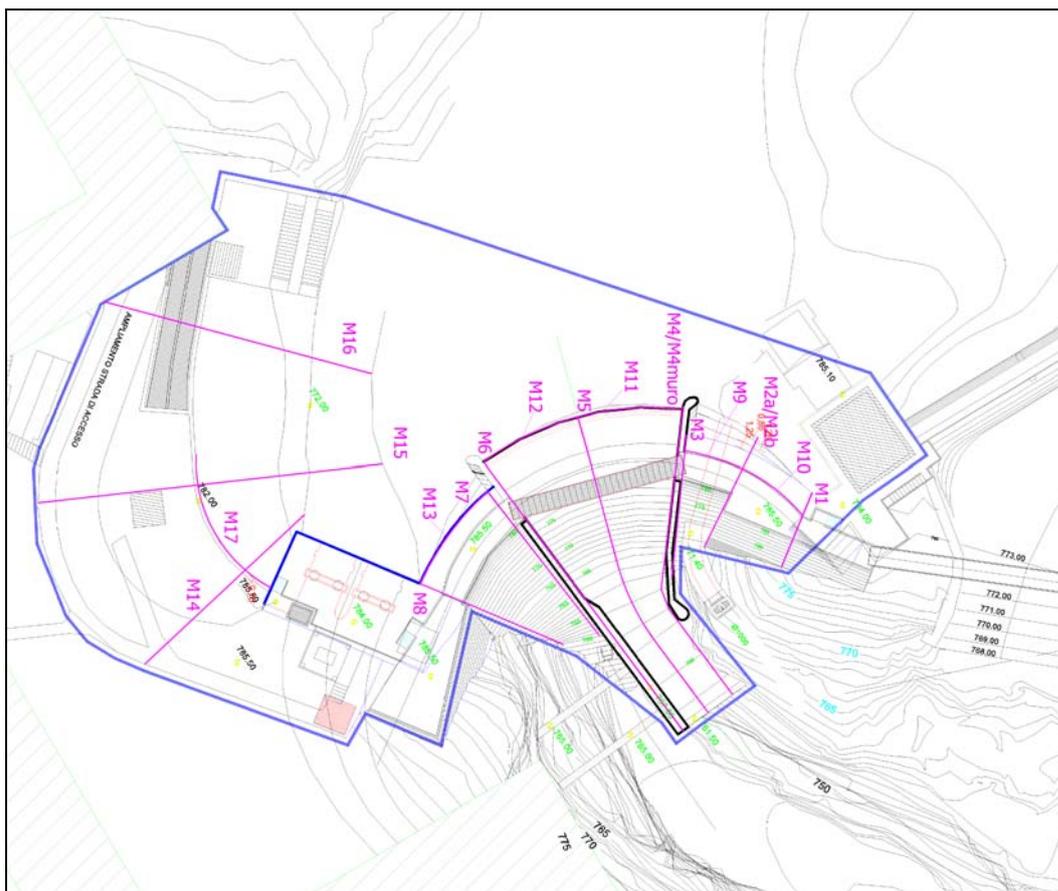


Figura 18 - Planimetria della nuova area modellata (perimetro blu), con indicazione in rosa delle sezioni estratte per la realizzazione delle modine

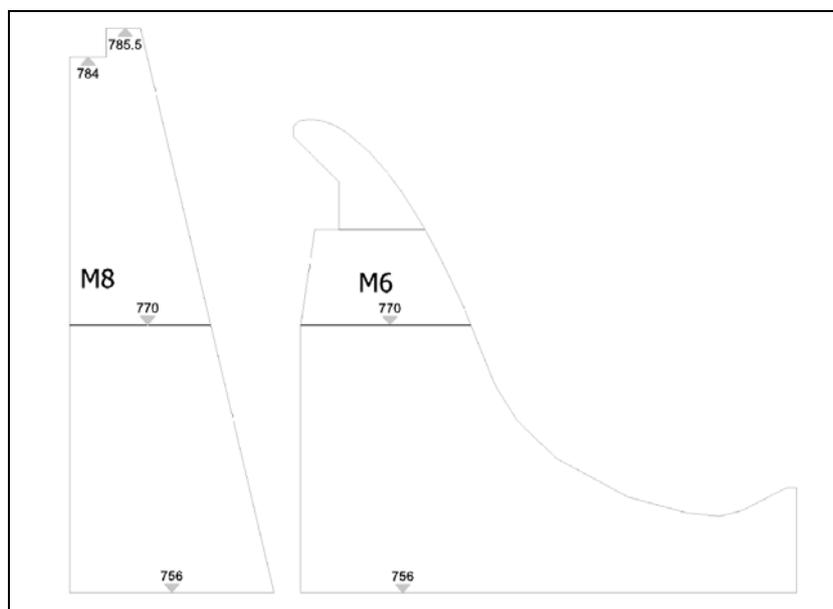


Figura 19 - Esempio di due sezioni utilizzate come modine

Tutte le modine della diga sono state fissate ad un piano di supporto in PVC su cui era stata incollata la pianta della diga stessa, così da posizionarle nella corretta posizione planimetrica (Figura 20). È stato poi messo lungo la modina centrale un tubo corrugato di qualche centimetro di diametro, al cui interno sono stati inseriti quattro tubicini in gomma del diametro interno di 4 mm che fungono da prese di pressione. Essi sono stati fissati alla modina centrale nei punti di misura p1, p2, p3, p4 indicati dal Committente (Figura 21 e Figura 22). La struttura, opportunamente casserata con lamiera di alluminio, è stata successivamente riempita con un getto di cemento bianco alleggerito. La finitura è stata eseguita con cemento bianco liscio.

Per la modellazione delle estremità dei muri dello sfioratore, alle modine M4 e M6 è stata applicata una piccola cassaforma realizzata in rete metallica, al cui interno è stato possibile gettare del cemento bianco.



Figura 20 – Modine assemblate e casserete per la realizzazione della diga



Figura 21 - Diga in fase di ultimazione. Si vedono: il getto di finitura quasi completato, il tubo corrugato e le prese di pressione inserite

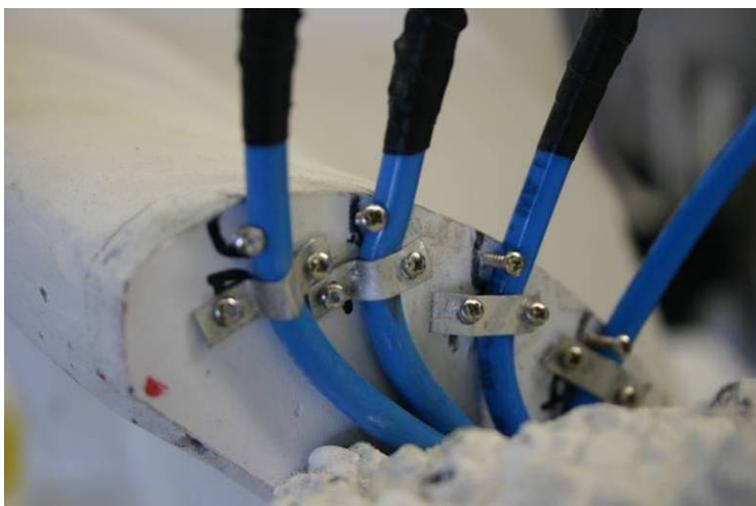


Figura 22 - Particolare del fissaggio delle prese di pressione alla modina centrale

Tutto il corpo diga, realizzato fuori opera, è stato poi posizionato all'interno del modello, sistemandolo nella corretta posizione planimetrica e contemporaneamente controllando la corretta quota dello sfioratore con strumento ottico.

L'estremità libera del tubo corrugato contenente le prese di pressione è stato portato all'esterno del muro perimetrale della vasca, per permettere la successiva realizzazione del quadro di misura.



Figura 23 - Corpo diga posizionato all'interno della vasca

Analogamente a quanto fatto per la diga, anche per la modellazione del versante destro ad essa adiacente è stata realizzata una struttura di base con modine in PVC, poi posizionata in vasca, e successivamente è stato eseguito il getto in cemento. Le due opere di presa sono state riprodotte solo nel loro ingombro esterno (Figura 24 e Figura 25).



Figura 24 - Modine per il versante destro. Si vedono anche le due opere di presa riprodotte con lastre di PVC



Figura 25 - Vista da monte delle nuove opere modellate

Terminata la fase di costruzione, il modello è stato verniciato e completato evidenziando le linee di quota nelle zone dove la specifica tecnica richiede il rilievo del pelo libero: lungo il muro di valle del canale esistente e sul muro di destra dello scarico in corpo diga.

Si è poi allestito il modello con i necessari strumenti di misura (Figura 26): 8 idrometri (2 a monte, 2 sopra lo scivolo e 4 a valle) e 12 prese di pressione (8 già presenti lungo l'asse del canale esistente e 4 lungo lo sfioratore in corpo diga). Per le misure di pressione sul muro di destra del nuovo scarico sono stati realizzati 4 fori filettati per ospitare il sensore di pressione durante le prove.

L'alimentazione idraulica del modello è garantita da un gruppo di pompaggio già esistente in quest'area del Centro Sperimentale destinata ai modelli fluviali. Esso è costituito da n. 4 elettropompe sommergibili della portata complessiva di circa 130 l/s, assemblate in un opportuno impianto di derivazione regolato da saracinesche.

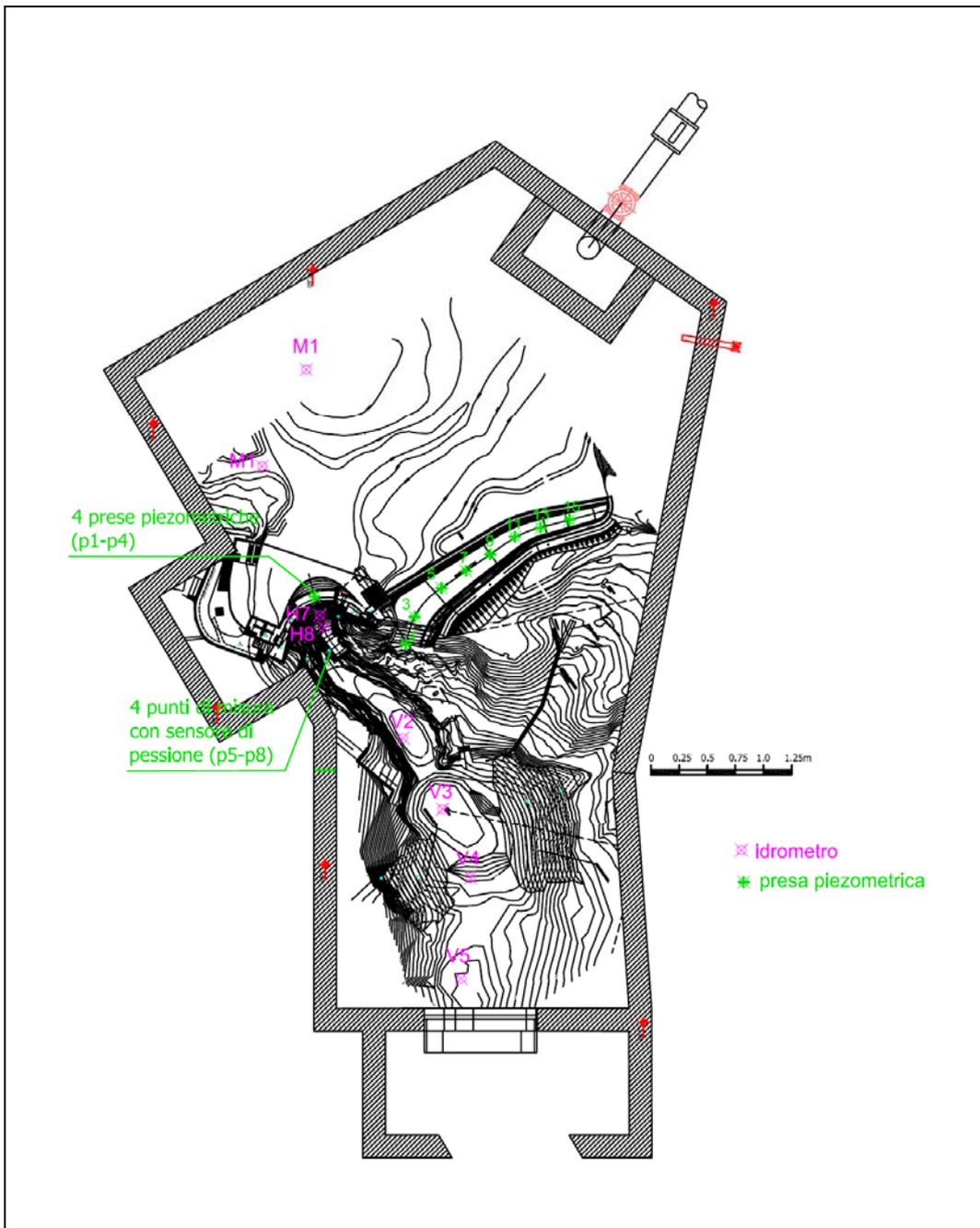


Figura 26 - Indicazione della posizione degli strumenti di misura sul modello

2.4. VERIFICA GEOMETRICA DELLA MODELLAZIONE

Preliminarmente all'esecuzione delle prove è stato effettuato il rilievo altimetrico del nuovo sfioratore in corpo diga, per verificare la corrispondenza tra dati di progetto e strutture effettivamente realizzate nel modello fisico. I versanti di monte e valle e il canale esistente erano stati oggetto di un accurato rilievo durante gli studi precedenti.

Vista l'importanza della quota di sfioro nel funzionamento del modello, per conoscenza si riportano qui anche i risultati del passato rilievo del ciglio dello sfioratore del canale esistente.

CIGLIO dello SFIORATORE del CANALE ESISTENTE			
<i>sezione</i>	<i>quote da progetto [m s.m.m.]</i>	<i>quote rilevate da modello [m s.m.m.]</i>	<i>$\Delta h_{mod-prog}$ [m]</i>
1	780.75	780.77	0.02
2	780.75	780.86	0.11
3	780.75	780.79	0.04
4	780.75	780.80	0.05
5	780.75	780.79	0.04
6	780.75	780.81	0.06
7	780.75	780.82	0.07
media Δh [m]			0.06
media $ \Delta h $ [m]			0.06

Tabella 2 - Verifica altimetrica dello sfioratore del canale esistente

Per la diga, nella tabella sottostante le sezioni fanno riferimento alla posizione delle modine, come riportate in Figura 18.

CIGLIO dello SFIORATORE in CORPO DIGA			
<i>sezione</i>	<i>quote da progetto [m s.m.m.]</i>	<i>quote rilevate da modello [m s.m.m.]</i>	<i>$\Delta h_{mod-prog}$ [m]</i>
Sinistra (modina M4)	780.75	780.88	0.13
Mezzeria tra M4 e M5	780.75	780.84	0.09
Centro (modina M5)	780.75	780.80	0.05
Mezzeria tra M5 e M6	780.75	780.82	0.07
Destra (modina M6)	780.75	780.78	0.03
media Δh [m]		780.82	0.07
media $ \Delta h $ [m]			0.07

Tabella 3 - Verifica altimetrica dello sfioratore in corpo diga

3. ALLESTIMENTO DELLA STRUMENTAZIONE ACCESSORIA E DI MISURA

3.1. MISURA DELLA PORTATA

La portata di prova viene misurata lungo il condotto di alimentazione del modello. A monte della saracinesca di regolazione è installato un misuratore elettromagnetico di portata, collegato ad un convertitore che visualizza, su display, il valore istantaneo della portata espressa in litri al secondo.



Figura 27 – Misuratore elettromagnetico di portata.

Lo strumento utilizzato viene impiegato per misurare la portata di liquidi elettricamente conduttivi. Il suo funzionamento si basa sulla legge di induzione elettromagnetica di Faraday.

Il fluido che scorre nella condotta è attraversato da un flusso magnetico di intensità B diretto ortogonalmente alla direzione del flusso.

Se il fluido è elettricamente conduttivo, si induce una differenza di potenziale E , rilevabile da due elettrodi posizionati perpendicolarmente sia alla direzione del flusso che del campo magnetico.

La differenza di potenziale E è direttamente proporzionale alla velocità media del fluido V , secondo la legge

$$E = K \cdot B \cdot D \cdot V \quad (1)$$

dove

- E [V]: tensione indotta agli elettrodi;
- K [-]: costante adimensionale;
- B [T]: densità del flusso magnetico;
- D [m]: diametro del condotto
- V [m/s]: velocità del fluido.

La portata del tubo Q (m³/s) è espressa come

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V \quad (2)$$

Combinando la formula (1) con la (2) si ottiene

$$Q = \frac{E \cdot \pi \cdot D}{4 \cdot K \cdot B} \quad (3)$$

che fornisce il valore della portata Q a partire dalla valutazione della differenza di potenziale E .

Le principali caratteristiche del misuratore di portata utilizzato per il modello fisico sono:

- Diametro nominale 200 mm;
- Pressione nominale PN16;
- Campo di misura da 0.06 a 6.00 m/s;
- Portata nominale 400 m³/h (110 l/s);
- Precisione ± 0.2 % della portata nominale;
- Ripetibilità ± 0.1 %;
- Errore di non linearità inapprezzabile rispetto alla precisione.

Il convertitore di portata ha lo scopo di amplificare e trasformare in unità ingegneristiche il segnale elettrico proveniente dal misuratore.

Le principali caratteristiche del convertitore di portata sono:

- Deriva termica <100 ppm per grado;

- Precisione $\pm 0.1 \%$.

3.2. MISURA DEI LIVELLI

Per la misura dei livelli idrici sono stati utilizzati due tipi di strumenti: idrometri manuali e prese di pressione (Figura 28). Queste ultime sono state utilizzate per le misure dei livelli idrici lungo l'asse del canale di scarico poiché sarebbe stato poco agevole utilizzare un ugual numero di idrometri, o un idrometro scorrevole lungo l'asse stesso.

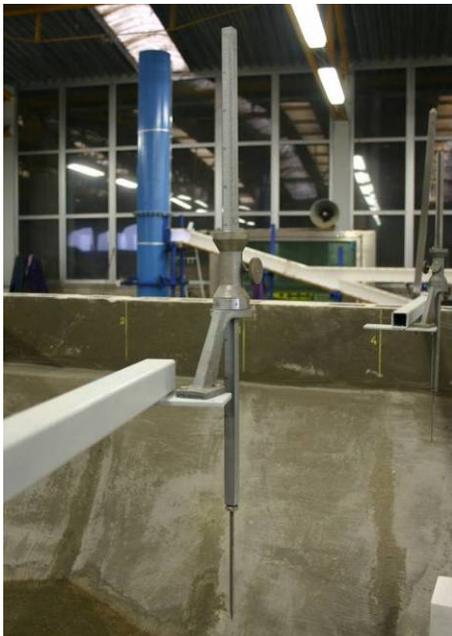


Figura 28 – Idrometro a punta e prese di pressione per la misura dei livelli.

Gli idrometri a punta consentono di effettuare misure puntuali di elevata precisione essendo provvisti di nonio decimale che consente di apprezzare le frazioni di millimetro. La risoluzione degli strumenti è di 0.1 mm modello.

Sul modello (Figura 26) sono stati installati n. 8 idrometri, 2 per determinare il livello del pelo libero nel bacino di monte, 4 per determinare il livello lungo l'alveo a valle della diga e 2 lungo l'asse dello scarico in corpo diga presso le verticali H7 e H8 indicate dal Committente. L'idrometro a monte della paratoia di scarico consente la

corretta riproduzione dei livelli di valle al variare della portata di prova, attraverso la regolazione della paratoia a ventola.

Un ulteriore idrometro è stato poi posto alla sezione terminale del canale esistente (Figura 29), vista la difficoltà nell'ottenere la misura del livello idrico con la presa di pressione lì prevista dato che in quel punto si ha il getto di uscita dell'acqua raccolta dal canale.



Figura 29 – Idrometro a punta posizionato in corrispondenza della sezione terminale del canale esistente.

Le prese piezometriche per le misure di livello erano già presenti sul fondo del canale esistente (posizione indicata in Figura 26). Erano state realizzate utilizzando tubicini di gomma retinata del diametro interno di 8 mm. Durante la posa delle modine dello scarico di superficie, prima di eseguire il getto, un'estremità dei tubetti era stata fissata alle modine stesse mentre l'altro capo era stato portato all'esterno della vasca e connesso al quadro di misura. Il quadro di misurazione delle pressioni (Figura 30) era stato realizzato incollando su un pannello in polietilene tubi in plexiglass, aventi diametro interno di 10 mm. Ogni presa piezometrica era stata dotata di raccordi a innesto rapido per consentire lo sfiato di eventuali bolle d'aria .

<i>Presa Piezometrica</i>	<i>Quota [m s.m.m.]</i>
1	768.00
3	773.27
5	774.12
7	774.55
9	774.98
11	775.43
13	775.91
15	777.10

Tabella 4 - Localizzazione altimetrica delle prese piezometriche al fondo del canale esistente

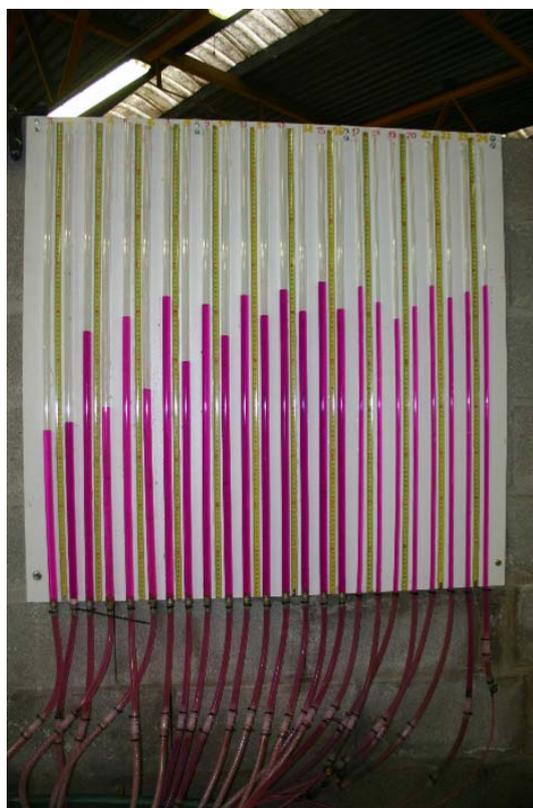


Figura 30 – Quadro di misura delle pressioni e connessione dei tubicini in gomma ai tubi verticali in plexiglass.



Figura 31 – Innesto per lo sfiato delle prese piezometriche.

In condizioni di portata nulla nei canali (condizioni denominate statiche) le prese piezometriche, una volta riempite d'acqua e dopo essersi accertati dell'assenza di eventuali bolle d'aria presenti al loro interno, indicano la quota della presa di pressione. Tale quota viene assunta come riferimento per misurare il livello dell'acqua sopra la presa in condizioni dinamiche, quando cioè si ha portata nei canali.

Per la misura del livello del pelo libero sul muro di destra in corpo diga sono stati disegnate presso le verticali di misura indicate del Committente (Figura 32) delle tacche orizzontali ogni 0.5 cm modello (corrispondenti a 20 cm prototipo), che hanno permesso di valutare l'altezza dell'acqua sulla parete senza avere strumenti (per esempio un righello) che disturbassero il flusso.

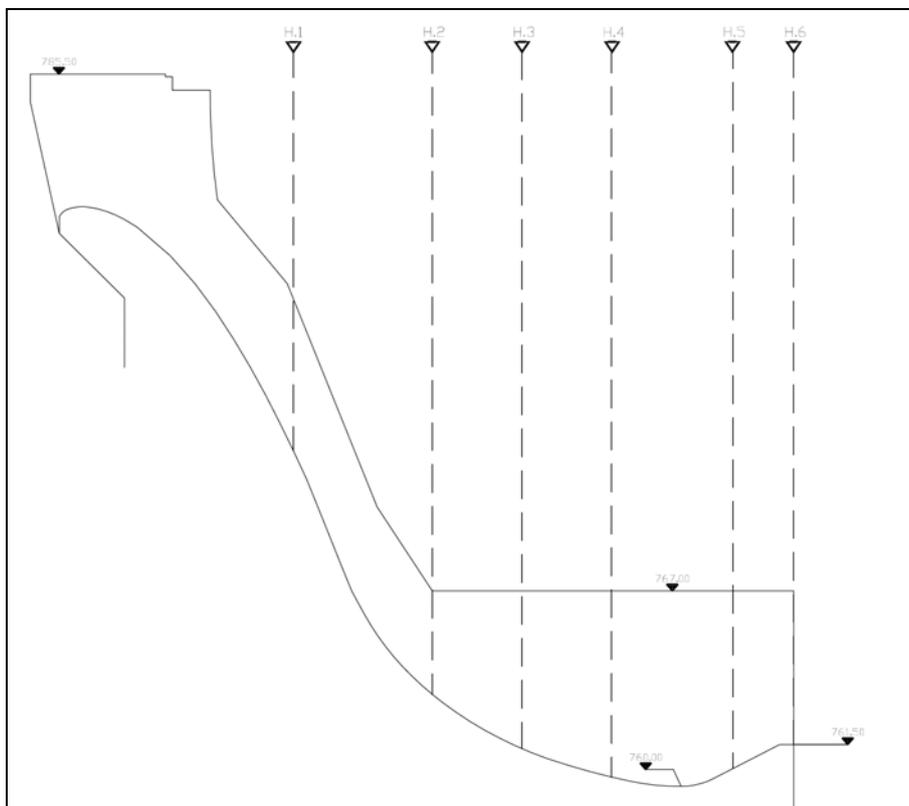


Figura 32 - Posizione delle verticali di misura H1-H6 del pelo libero sul muro di destra dello scarico in corpo diga

3.3. MISURA DELLA PRESSIONE LUNGO LO SFIORATORE IN CORPO DIGA

Il ciglio di sfioro è stato dotato di 4 prese piezometriche per la misura del campo di pressioni in corrispondenza del ciglio stesso e lungo il paramento di valle, in corrispondenza della sezione di mezzeria.

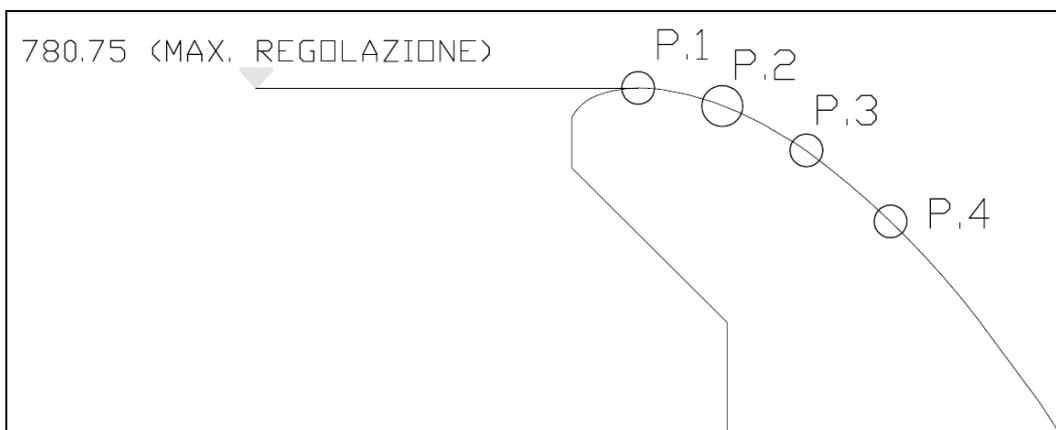


Tabella 5 - Ubicazione dei punti di misura della pressione sul ciglio di sfioro in corpo diga

<i>Pres Piezometrica</i>	<i>Quota [m.s.m.m.]</i>
P1	780.75
P2	780.53
P3	780.00
P4	779.15

Tabella 6 - Localizzazione altimetrica delle prese piezometriche poste lungo il profilo di sfioro dello scarico in corpo diga.

Le prese piezometriche sullo sfioratore sono state realizzate utilizzando tubo di poliuretano del diametro interno di 4 mm e fissate alla modina in modo da essere ortogonali al profilo di sfioro. Il quadro di misurazione è stato realizzato incollando sul pannello in polietilene 4 tubi in plexiglass. Per consentire lo sfiato di eventuali bolle d'aria presenti all'interno del sistema di misura, ciascun tubo in poliuretano è stato fissato a quello in plexiglass mediante un raccordo a innesto rapido.

Come per le prese sul fondo canale, lo zero di riferimento è stato determinato riempiendo d'acqua le prese in assenza di bolle d'aria e in condizioni statiche (portata sfiorante nulla). Tale quota viene assunta come riferimento per misurare, in termini di altezza di colonna d'acqua, la depressione o la sovrappressione che si instaura in condizioni dinamiche sulla superficie dello sfioratore, ovvero nella condizione di sfioro sulla soglia.

3.4. MISURA DELLA PRESSIONE SUL MURO DI DESTRA

La misure di pressione sono eseguite con un trasduttore elettrico, il cui principio di funzionamento si basa sulla misura della deformazione prodotta dalla pressione totale (dinamica + statica) su di una membrana posta in contatto con il fluido. Si è scelto uno strumento prodotto dalla società GE Sensing, in particolare il modello GE DRUCK PDCR 1830 (Figura 33). Lo strumento in questione è in grado di misurare una pressione massima di 1.5 m di colonna d'acqua con un'accuratezza di ± 1.5 mm nella scala del modello, e quindi 6 cm nel reale.

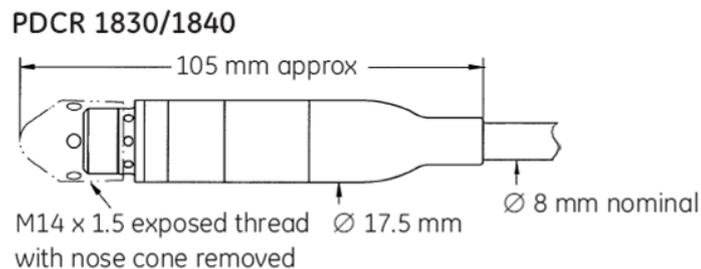


Figura 33 - Il sensore di pressione GE DRUCK PDCR 1830.

Durante le prove, il segnale analogico (una tensione elettrica) proveniente dal sensore viene convertito in digitale da una scheda analogico/digitale e salvato sul disco rigido di un PC di acquisizione.

Nel modello, la curva di conversione tra tensione elettrica di uscita in Volt e pressione misurata in cm di colonna d'acqua è mostrata in Figura 34. La linearità della relazione di conversione è sintomo di funzionamento ottimo del sistema di misura, che non presenta, quindi, fenomeni di instabilità, quali isteresi e deriva di zero.

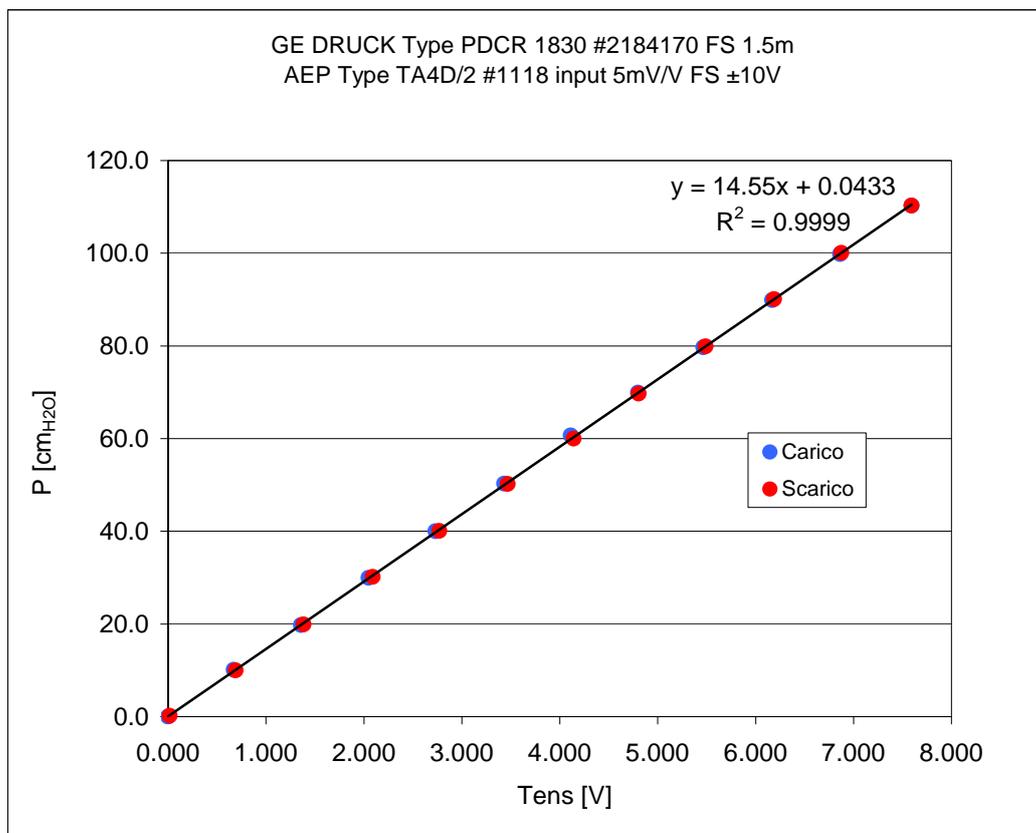


Figura 34 - Curva di taratura del sensore di pressione

Per ogni punto di misura, la pressione è acquisita con una frequenza di campionamento di 50 Hz e per una durata di 300 s nel modello, che corrispondono, secondo le leggi di similitudine di Froude, a 1897.4 s nel reale. La frequenza di 50 Hz si ritiene sia sufficiente a cogliere il dinamismo delle oscillazioni di pressione agenti sul paramento del muro.

La restituzione finale delle misure di pressione è il tracciato temporale della registrazione nella scala reale. L'unità di misura usata per rappresentare la pressione è il metro di colonna d'acqua.

La denominazione (P5,P6,P7,P8) e la posizione geometrica dei punti di misura è schematicamente riportata in Figura 35.

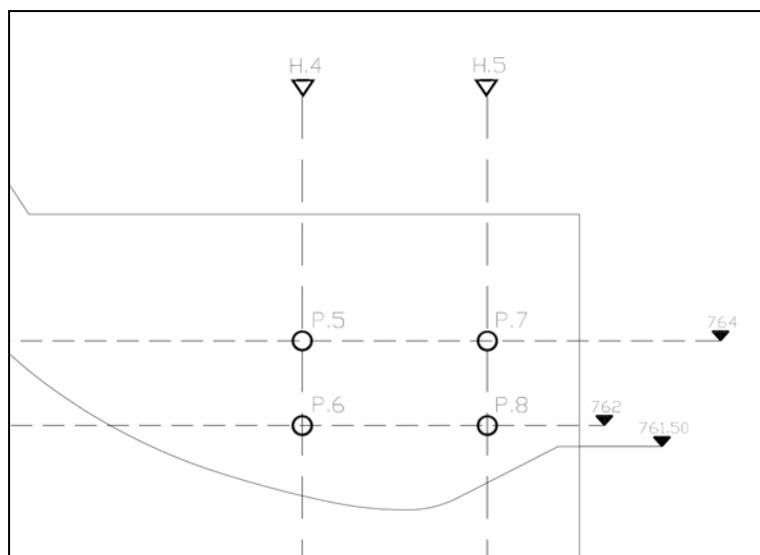


Figura 35 - Posizione dei punti di misura della pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

Per il fissaggio dello strumento di misura sono stati realizzati dei fori filettati sul muro di destra dello scarico in corpo diga. Sfruttando la filettatura presente sulla testa del sensore è stato possibile avvitarlo nei fori. L'installazione così predisposta elimina qualsiasi interferenza dello strumento di misura sul flusso in arrivo del quale si vuole misurare l'effetto, infatti il corpo del misuratore giace completamente al di fuori del flusso d'acqua e l'estremità che rileva le pressioni è aderente al muro lato canale, come evidente in Figura 36.



Figura 36 - Particolare del sensore in posizione di misura.

4. TIPOLOGIA DI PROVE ESEGUITE SUL MODELLO FISICO

4.1. GENERALITÀ

Lo scopo della modellazione è di verificare che i due scarichi di superficie siano in grado di scaricare complessivamente la portata di 1020 m³/s con una quota nel serbatoio non superiore alla quota di massimo invaso approvata (784.50 m s.m.m.), ipotizzando che lo scarico intermedio scarichi 167 m³/s.

Le prove effettuate sul modello fisico sono state predisposte per:

- determinare l'efficienza idraulica dei due scarichi di superficie (quello lungo il canale esistente con muro di vale sopraelevato e nuovo scarico in progetto in corpo diga), in conseguenza della rivalutazione della portata millenaria e dei relativi interventi di adeguamento previsti e progettati;
- verificare la regolarità di funzionamento del nuovo scarico superficiale in corpo diga per differenti condizioni di livello di invaso, determinandone la scala delle portate;
- verificare la regolarità delle condizioni di deflusso a valle della diga.

Nei paragrafi successivi sono inserite alcune foto del funzionamento del modello fisico. Si rimanda, comunque, ai rilievi fotografici e alle videoriprese allegati al presente rapporto per una visione completa del comportamento del modello fisico alle diverse condizioni di prova.

4.2. PROVA CON MASSIMO INVASO

Scopo della prova era la determinazione della portata complessivamente scaricata dalla diga (tramite entrambi gli scarichi di superficie) con il livello nel bacino di monte pari alla quota di massimo invaso prevista 784.50 m s.m.m.

La portata è stata man mano regolata finchè il livello nell'invaso a monte si è stabilizzato alla corretta quota.

4.3. PROVA CON PORTATA 1020 m³/s

Scopo della prova era la determinazione della livello di invaso che consente lo smaltimento della portata 1020 m³/s attraverso i due scarichi di superficie.

In accordo a quanto definito nella Specifica Tecnica fornita dal Committente sono state eseguite le seguenti misure:

- Livello nell'invaso a monte della diga in due punti ad una distanza adeguata dallo scarico di superficie da non risentire dell'effetto di richiamo del ciglio di sfioro (idrometri M1 e M2);
- Livello in tre sezioni di alveo tra la fine dello scivolo a valle della diga e lo stramazzo finale (idrometri V2, V3, V4);
- Livello sullo stramazzo finale del modello (idrometro V5);
- Battente idrico lungo l'asse del canale esistente dello scarico di superficie in prossimità delle sezioni di progetto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 oltre a quella terminale dello scivolo (prese 1,3,5,7,9,11,13,15; idrometro C1 in sostituzione della presa 1);
- Battente idrico in due punti lungo l'asse dello scarico in corpo diga (idrometri H7 e H8);
- Livello idrico sul muro di destra dello scarico in corpo diga presso 6 verticali di misura (H1, H2, H3, H4, H5, H6);
- Pressioni idriche in quattro punti in asse al nuovo sfioratore in corpo diga, lungo un allineamento longitudinale monte-valle perpendicolare alla soglia sfiorante (prese di pressione P1, P2, P3, P4)
- Pressione totale in quattro punti del muro di destra dello scarico in corpo diga, in corrispondenza delle verticali H4 e H5 (punti P5, P6, P7, P8)

A valle dell'ultima sezione di alveo del torrente Anza rappresentata nel modello, la regolazione della paratoia a ventola ha permesso di riprodurre il livello della corrente che scorre nell'alveo per quel valore di portata scaricata; questo livello del tirante di valle era stato ricavato con modello matematico 1-D HEC-RAS in occasione del primo studio (Dicembre 2007).

E' stata inoltre rilevata con fotografie quotate la superficie bagnata lungo il muro di valle del canale esistente e lungo il muro di destra del nuovo scarico. Quest'ultimo è stato riprodotto su modello con una quota di sommità maggiore di quella prevista in progetto per riuscire a determinare il livello raggiunto dall'acqua anche nei punti dove altrimenti si sarebbero avute fuoriuscite. Nei grafici che rappresentano i risultati è comunque riportato il profilo del muro come da progetto.

Le prove sul modello fisico sono state eseguite regolando la portata in ingresso alla vasca di carico sino al raggiungimento del valore di prova. Successivamente si è operato sulla regolazione della paratoia a ventola presente allo scarico del modello in modo da riprodurre le condizioni idrometriche che si instaurano nell'alveo a valle della diga; nel modello comunque le oscillazioni del pelo libero lungo il torrente Anza non consentono una precisa determinazione del tirante. Una volta raggiunta la condizione di stazionarietà del moto sono state effettuate le misure sopraelencate.

4.4. SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO IN CORPO DIGA

Scopo della prova era la determinazione delle portate defluenti dal solo nuovo scarico di superficie in corpo diga per cinque differenti quote dell'invaso di monte:

- 784.50 m s.m.m.
- 784.00 m s.m.m.
- 783.00 m s.m.m.
- 782.00 m s.m.m.
- 781.00 m s.m.m.

Le prove sono state eseguite regolando la portata in ingresso al modello sino al raggiungimento del livello idrometrico di prova nella vasca di carico.

In accordo a quanto definito con il Committente, per ognuna delle cinque prove sono state eseguite le seguenti misure:

- Livello nell'invaso a monte della diga (idrometri M1 e M2);

- Battente idrico in due punti lungo l'asse dello scarico in corpo diga (idrometri H7 e H8);
- Livello idrico sul muro di destra dello scarico in corpo diga presso 6 verticali di misura (H1, H2, H3, H4, H5, H6);
- Pressioni idriche in quattro punti in asse al nuovo sfioratore in corpo diga, lungo un allineamento longitudinale monte-valle perpendicolare alla soglia sfiorante (prese di pressione P1, P2, P3, P4)
- Pressione totale in quattro punti del muro di destra dello scarico in corpo diga, in corrispondenza delle verticali H4 e H5 (punti P5, P6, P7, P8)

E' stata inoltre rilevata con fotografie quotate la superficie bagnata lungo il muro di destra del nuovo scarico.

5. RISULTATI DELLE PROVE ESEGUITE SUL MODELLO FISICO

5.1. GENERALITÀ

I risultati ottenuti sono riportati in forma grafica e tabellare nei successivi paragrafi.

In particolare, a seconda delle misure previste per ogni prova, sono riportati:

- il valore della portata proveniente da monte,
- i livelli raggiunti dal pelo libero nel bacino di monte (idrometri M1 e M2), lungo l'alveo di valle (idrometri V2-V5), lungo il canale di scarico esistente (prese piezometriche 1, 3, 5, 7, 9, 11, 15), lungo il muro di destra dello scarico in corpo diga (verticali H1-H6), in due punti lungo l'asse dello scarico in corpo diga (idrometri H7 e H8).
- le pressioni idriche sul ciglio di sfioro del nuovo scarico (prese P1-P4) e sul muro di destra del nuovo scarico (sensore di pressione ai punti P5-P8).

Sono inoltre rilevate con foto le altezze raggiunte dall'acqua lungo il muro di valle del canale esistente e sul muro di destra dello scarico in corpo diga.

Si fa presente che tutti i valori indicati sono riferiti alla scala del reale.

Il rilievo fotografico e la documentazione filmata delle prove eseguite sono allegate alla presente relazione.

5.2. PROVA CON MASSIMO INVASO

La portata in ingresso è stata regolata finchè nel bacino di monte il livello di invaso si è stabilizzato attorno alla quota di massimo invaso prevista di 784.50 m s.m.m.

I due scarichi di superficie complessivamente scaricano una portata media di 1054.33 m³/s.

I risultati medi delle prove eseguite sono riportati nella seguente tabella:

quota invaso media [m s.m.m.]	784.48
portata media scaricata [m ³ /s]	1054.33

Tabella 7 – Risultati medi delle prove con massimo invaso

5.3. PROVA CON PORTATA 1020 m³/s

La portata in ingresso al modello è stata regolata attorno al valore di 1020 m³/s (Tabella 8). Raggiunto il regime nel modello, sono state eseguite tutte le misure elencate al paragrafo 4.3, e di cui si riportano qui i risultati. Date le oscillazioni del pelo libero riscontrate nel modello per questa prova, per diverse misure sono stati rilevati i valori massimi e minimi, oltre che il valore mediamente riscontrato.

Di seguito sono inoltre riportate rappresentazioni grafiche dei dati rilevati, che meglio illustrano il comportamento del modello.

	max	min	media
Portata in ingresso [m ³ /s]	1023.06	1014.96	1019.01

Tabella 8 - Valori massimo, minimo e medio della portata in ingresso al modello durante la prova

5.3.1. Battenti idrici

La portata 1020 m³/s viene scaricata con una quota media nell'invaso di monte di 784.33 m s.m.m., minore perciò della quota di massimo vaso 784.50 m s.m.m..

Nella Tabella 9 sono riportate le quote del pelo libero rilevate a monte e valle della diga; si sottolinea però l'incertezza delle quote rilevate a valle data l'accentuata irregolarità del deflusso in questa zona. In particolare, l'idrometro V2 viene a trovarsi sopra il getto di uscita dello scarico in corpo diga (Figura 37).

punto di misura	quota pelo libero [m s.m.m.]		
	max	min	media
invaso M1	784.41	784.25	784.33
invaso M2	784.39	784.29	784.34
valle V2	755.85	754.45	755.15
valle V3	748.63	747.23	747.93
valle V4	748.07	746.55	747.31
valle V5	750.49	748.69	749.59

Tabella 9 - Battenti idrici a monte e valle della diga



Figura 37 - Vista da monte del deflusso di valle

Per quanto riguarda il deflusso nel canale di scarico esistente, esso è sempre ben contenuto dal muro di valle, come si nota sia dai valori numerici (Tabella 10) che dal rilievo fotografico (Figura 39).

È riportata anche la foto delle condizioni che si instaurano nella parte terminale del canale stesso presso il muro di destra, poiché il deflusso variabile nel tempo ed, a volte, le intumescenze superano la quota del muro esistente (nella foto appare tracciata in rosso) .

canale esistente			
presa n°	sezione	tirante [m]	quota pelo libero [m s.m.m.]
15	1	7.08	784.18
13	2	8.20	784.11
11	3	8.36	783.79
9	4	8.28	783.26
7	5	8.44	782.99
5	6	7.68	781.80
3	7	6.44	779.71
1	10	7.67	775.67

Tabella 10 - Battenti idrici e relative quote del pelo libero lungo l'asse del canale di scarico esistente

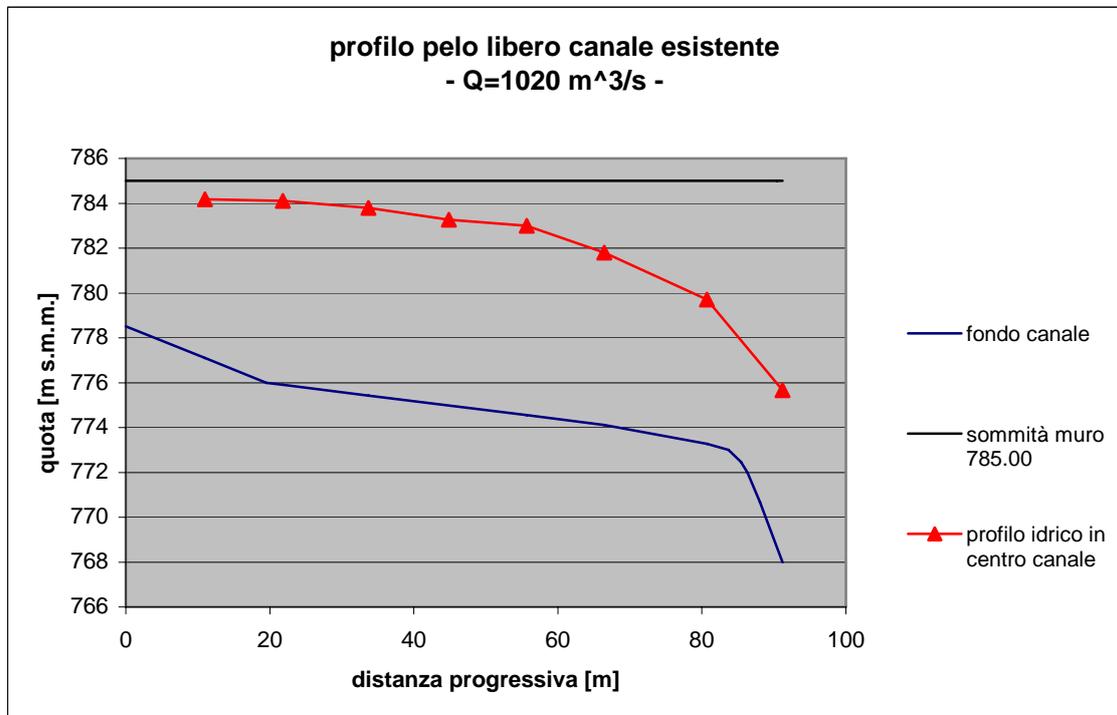
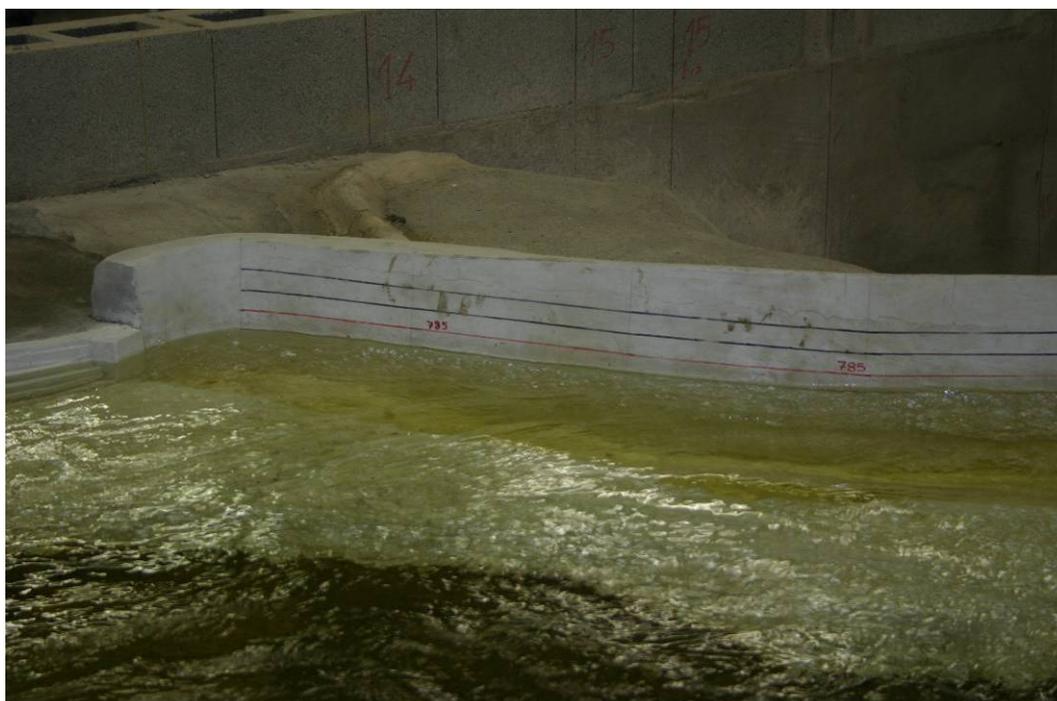
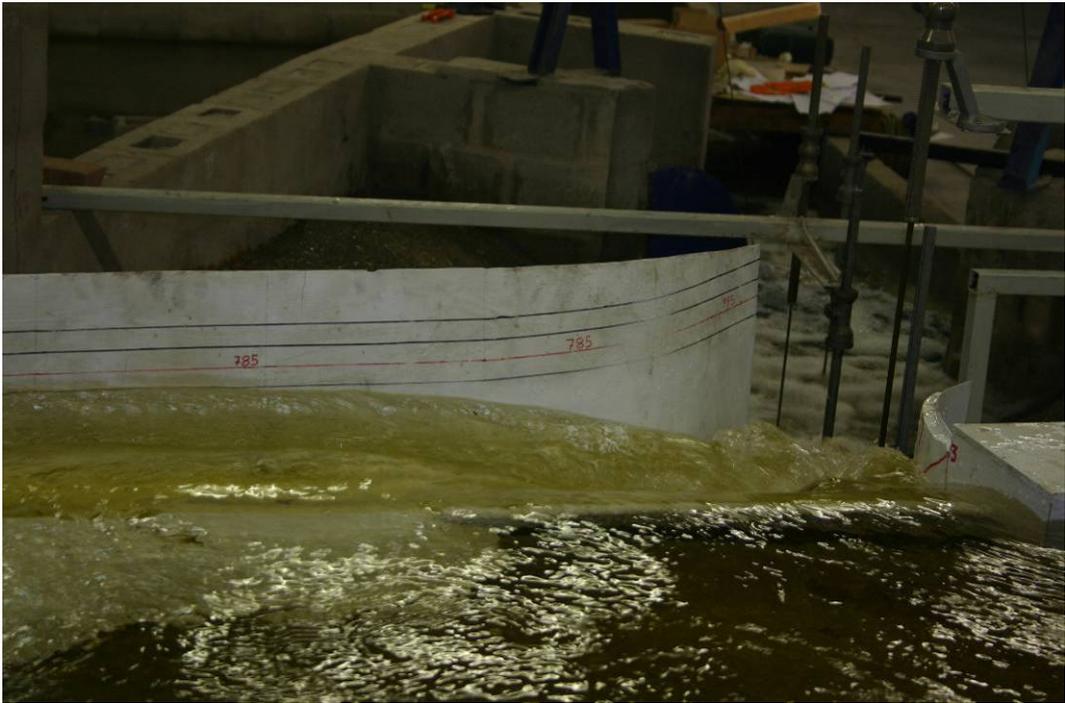


Figura 38 - Andamento del pelo libero nel canale esistente per la portata in ingresso $1020 \text{ m}^3/\text{s}$





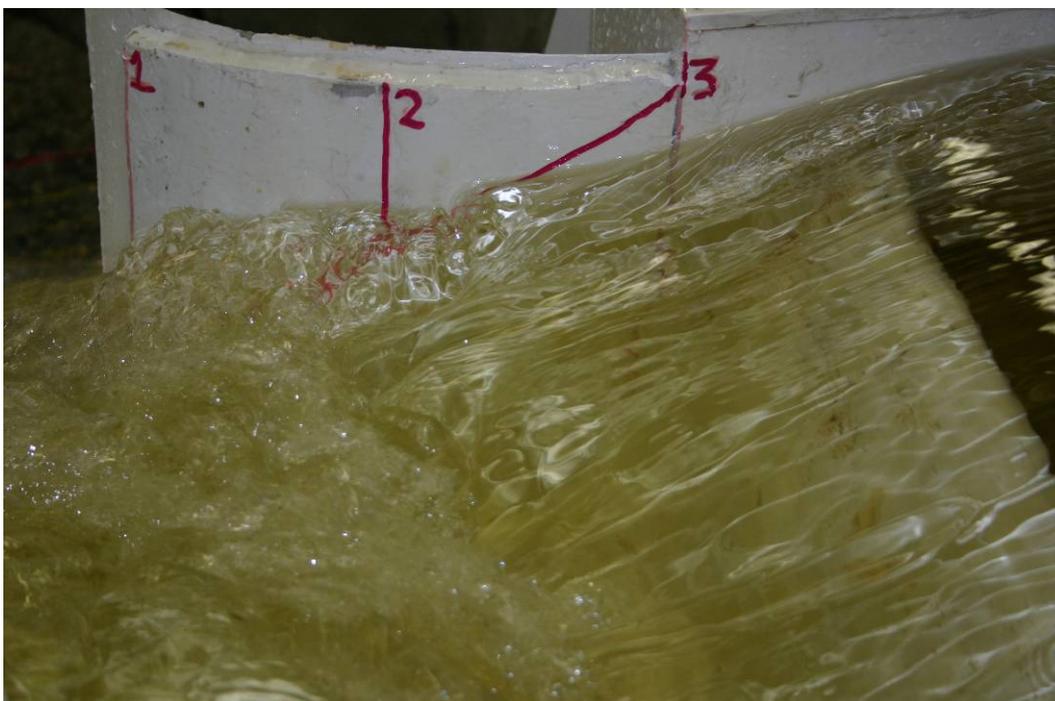


Figura 39 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di valle e sul muro terminale di destra del canale esistente per la portata 1020 m³/s

Per lo scarico in corpo diga sono state rilevate le quote del pelo libero in 8 punti, di cui 6 lungo il muro di destra. Vista la variabilità del deflusso attraverso il nuovo scarico per questa portata, sono stati misurati anche i valori massimi e minimi delle pulsazioni del pelo libero, oltre che il valore mediamente presente.

Si nota (Figura 40) che a monte e valle della verticale h₂ il livello dell'acqua supera la quota di sommità del muro in progetto. Nel rilievo fotografico si vede il muro in una configurazione più alta, che ha permesso il rilevamento delle quote dell'acqua anche nei tratti in cui ci sarebbero state invece fuoriuscite. Le linee orizzontali che si vedono rappresentano linee di quota a distanza di 1m l'una dall'altra; in rosso sono tracciate le quote multiple di 5m.

Scarico in corpo diga						
verticale	tirante [m]			quota pelo libero [m s.m.m.]		
	max	min	media	max	min	media
h1	6.60	4.60	5.60	778.60	776.60	777.60
h2	7.00	4.40	5.20	770.30	767.70	768.50
h3	5.20	3.20	3.80	766.55	764.55	765.15
h4	4.80	3.00	3.40	765.13	763.33	763.73
h5	3.80	2.80	3.40	764.44	763.44	764.04
h6	3.80	3.00	3.40	765.30	764.50	764.90
h7	5.02	4.14	4.58	777.02	776.14	776.58
h8	4.46	3.1	3.78	767.76	766.4	767.08

Tabella 11 - Battenti idrici e relative quote del pelo libero lungo il muro di destra (h1-h6) e lungo l'asse (h7-h8) del nuovo scarico in corpo diga

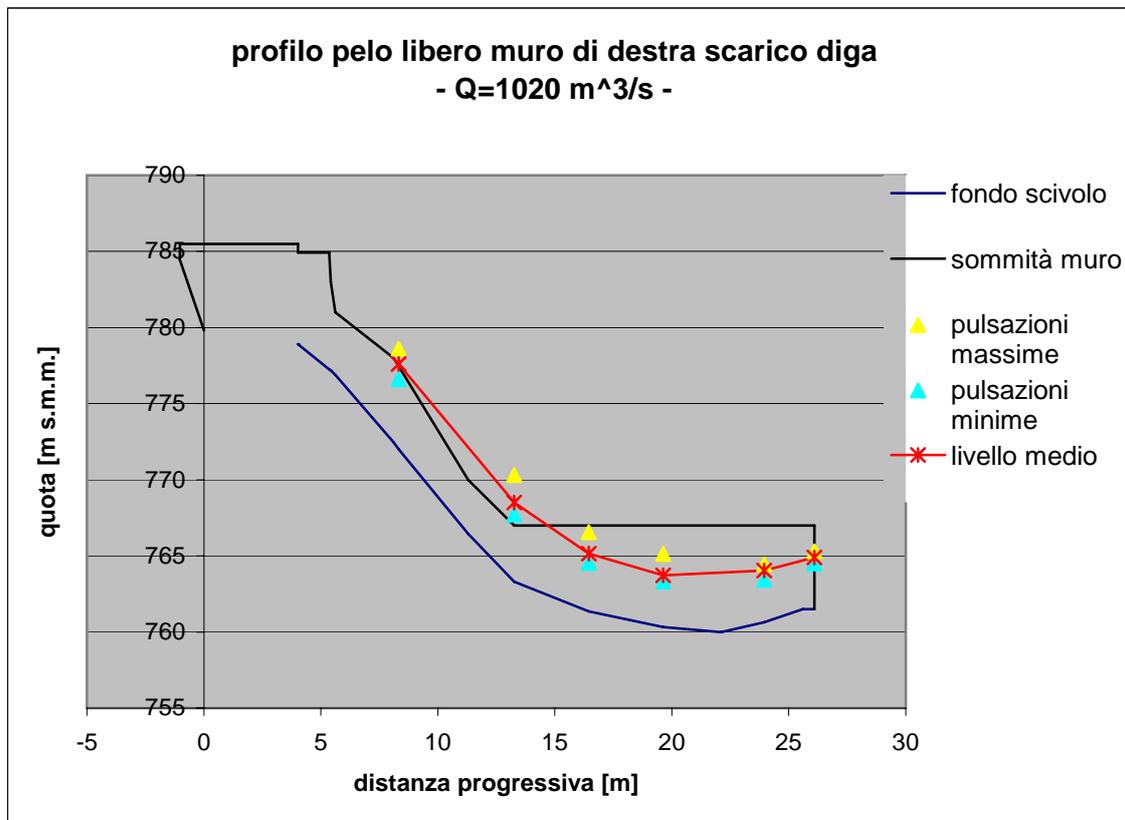
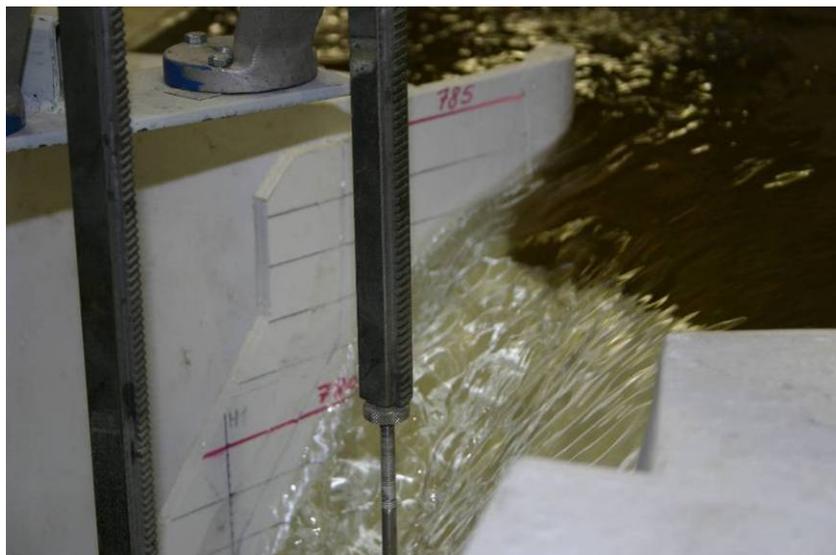
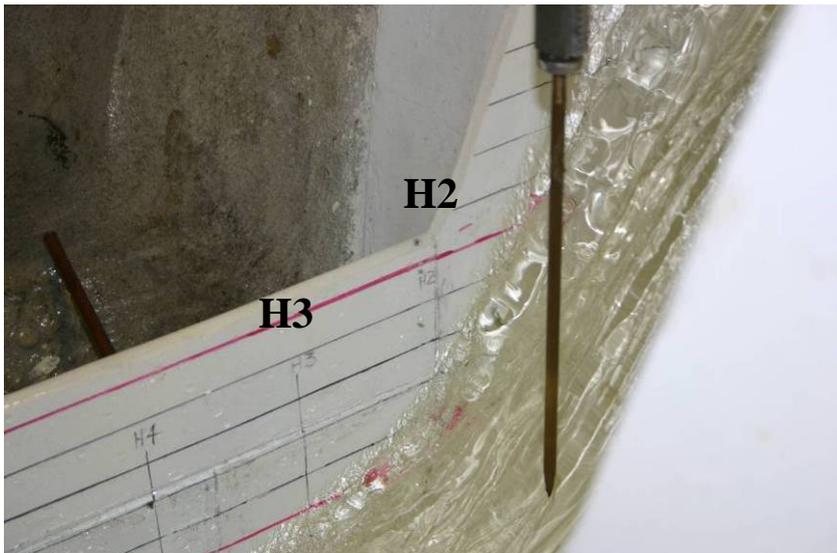
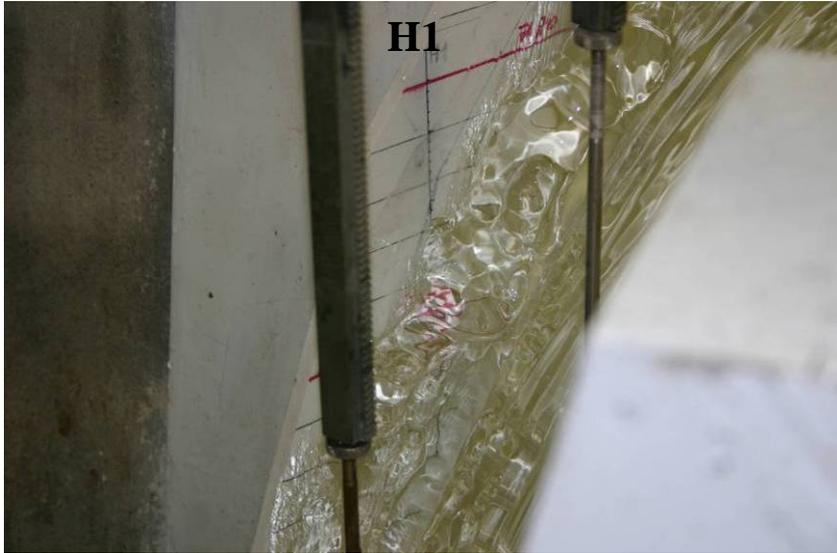


Figura 40 - Andamento del pelo libero sul muro di destra dello scarico in corpo diga





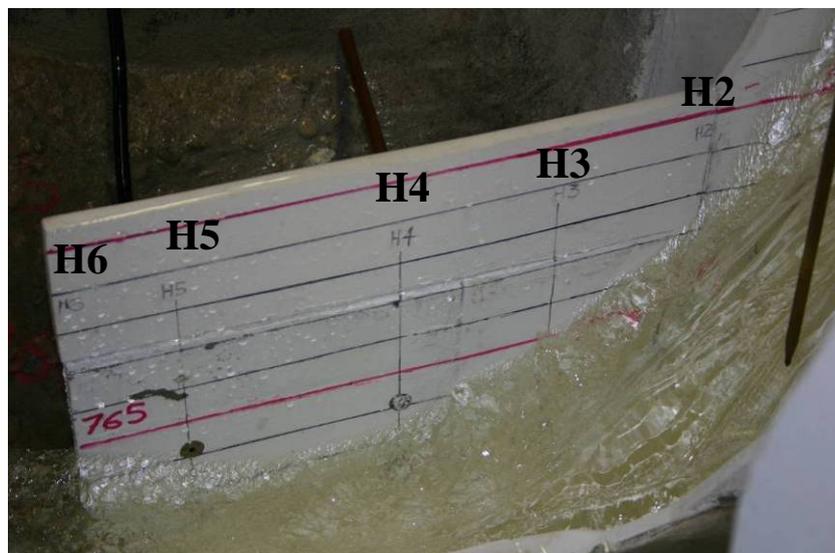


Figura 41 - Rilievo fotografico del pelo libero medio lungo il muro di destra dello scarico in corpo diga

5.3.2. Pressioni

Le pressioni sono state rilevate sia lungo il profilo di sfioro del nuovo scarico, nella sezione di mezzeria, attraverso quattro prese piezometriche, sia in quattro punti presso il muro di destra dello scarico, con sensori di pressione.

Sul profilo di sfioro si nota una debole depressione ai punti p2 e p3.

Dalle registrazioni della pressione ai punti p5-p8 si sono ricavati i valori massimo, medio e deviazione standard (Tabella 13); ai punti p5 e p7 l'acqua mediamente lambiva la presa, come si può notare dal valore medio registrato.

Di seguito sono riportati anche gli andamenti temporali dei segnali.

Sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione relativa [m]
p1	780.75	0.36
p2	780.53	-0.32
p3	780.00	-0.20
p4	779.15	0.20

Tabella 12 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

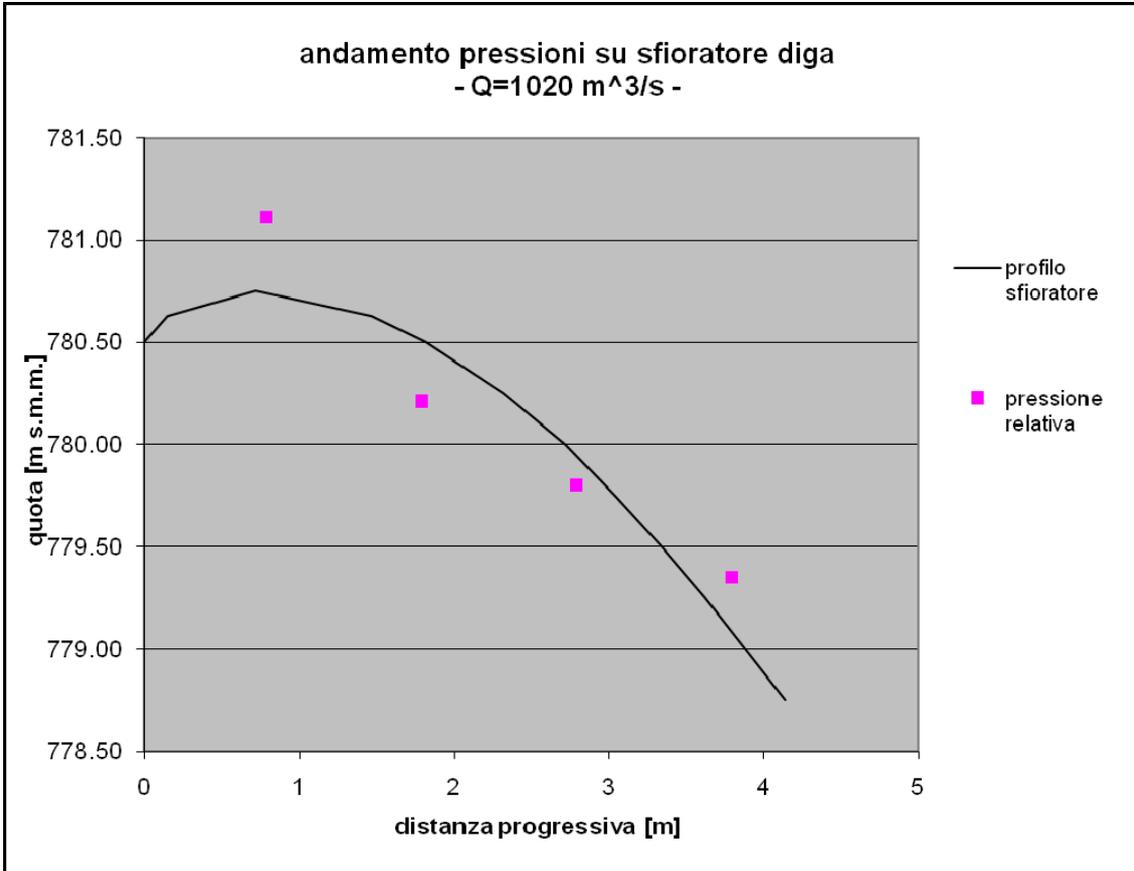


Figura 42 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

Muro destro scarico diga				
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione [m]		
		max	media	deviazione standard
p5	764.00	1.73	0.31	0.12
p6	762.00	6.89	5.53	0.36
p7	764.00	1.19	0.20	0.05
p8	762.00	5.15	3.91	0.37

Tabella 13 - Valori massimi, medi e deviazione standard delle pressioni registrate coi sensori di pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

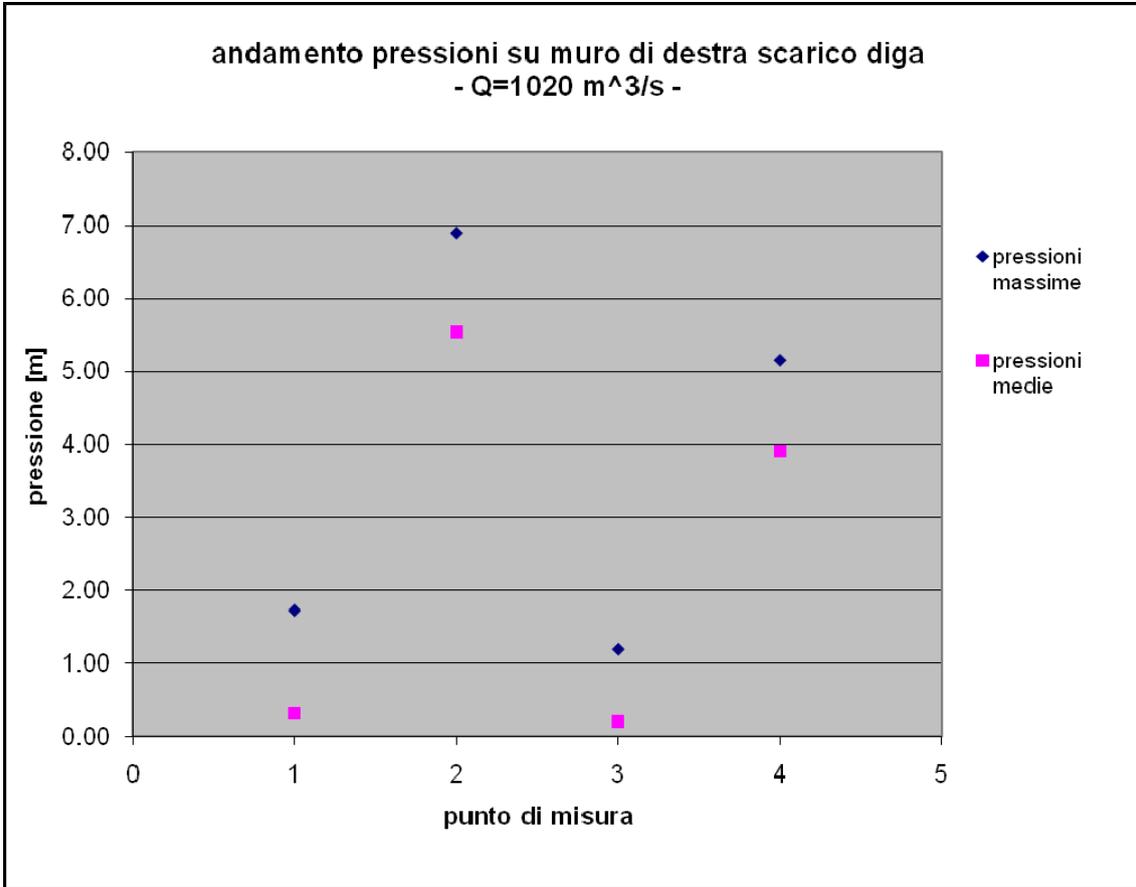
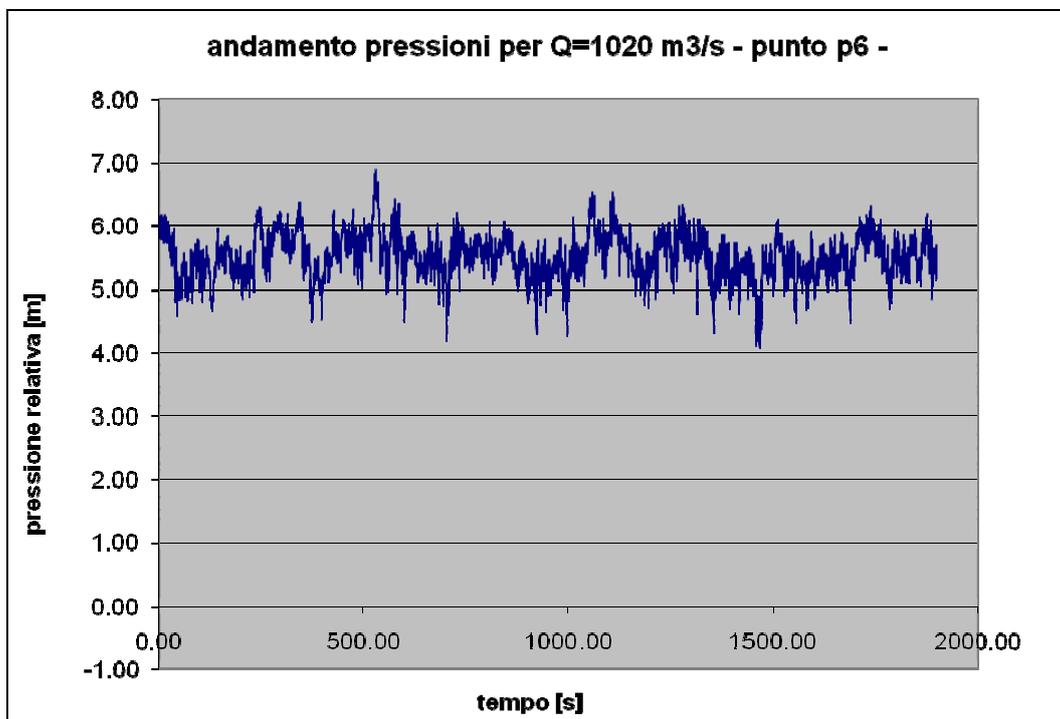
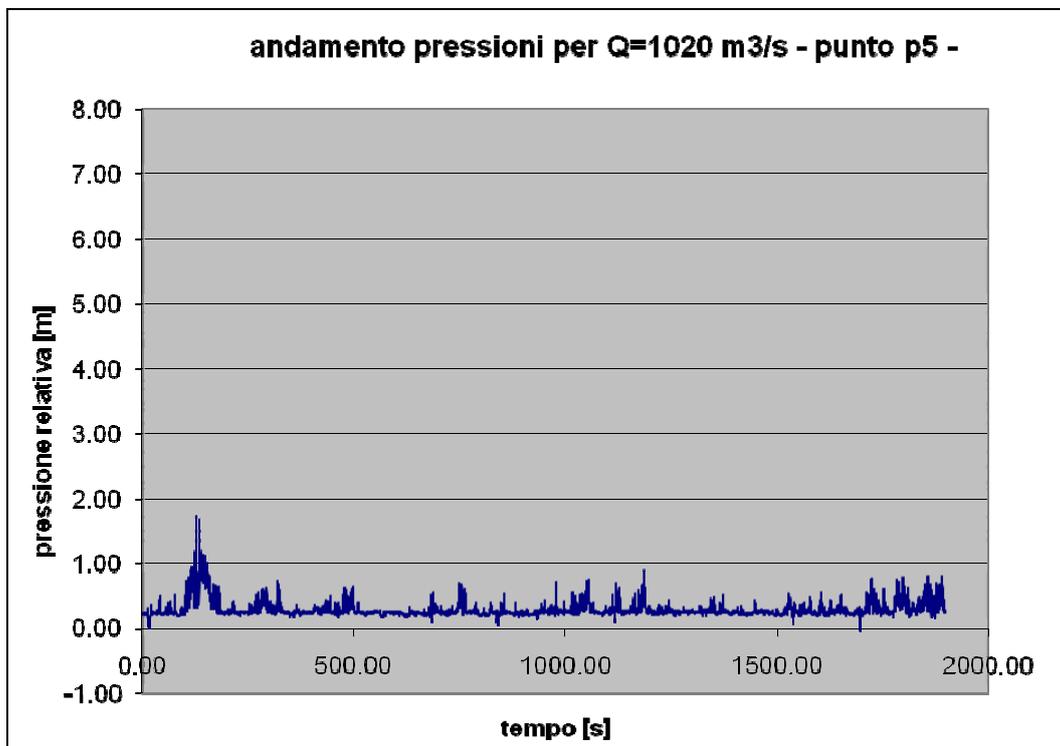


Figura 43 - Valori massimi e medi delle pressioni registrate ai punti p5-p8 (nel grafico in ascissa 1-4)



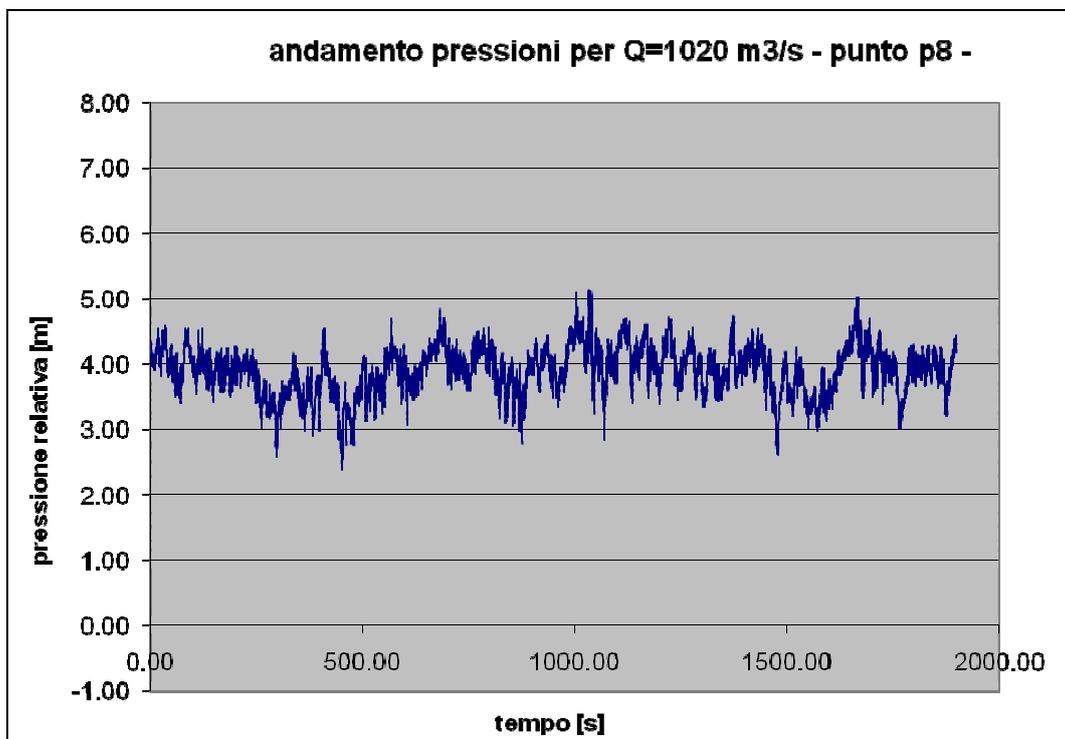
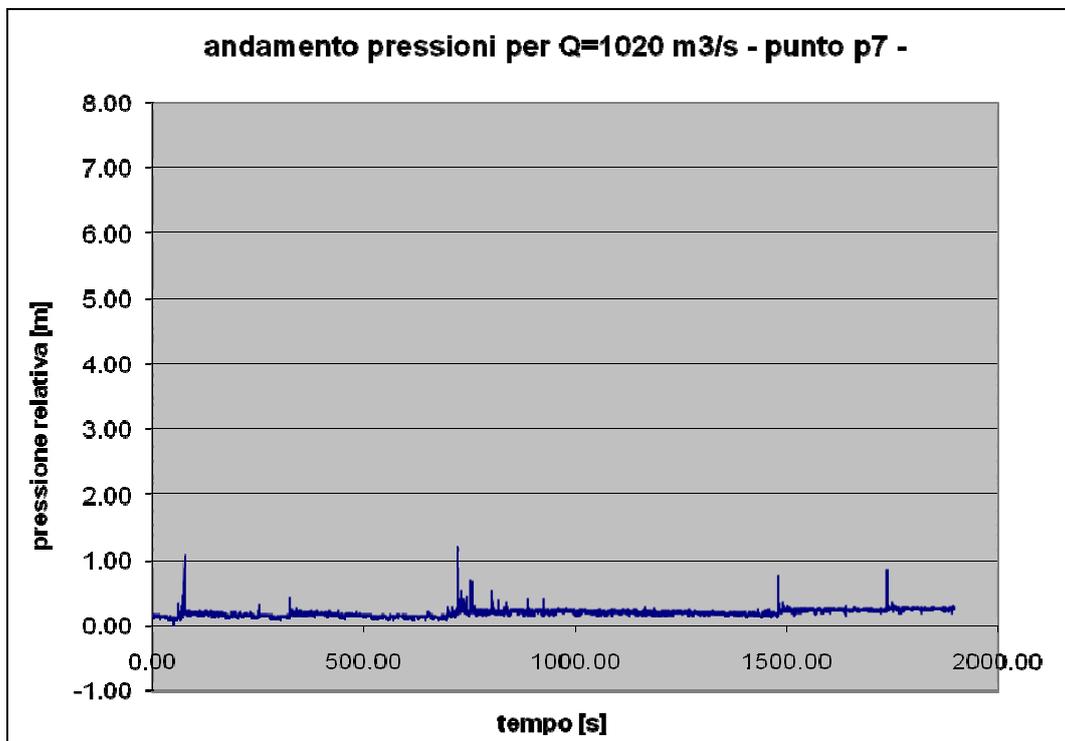


Figura 44 - Andamenti temporali delle pressioni registrate ai punti p5-p8

5.1. SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO IN CORPO DIGA

La prova è stata eseguita regolando la portata in ingresso al modello in modo che la quota di invaso si stabilizzasse attorno al valore voluto. Sono state eseguite prove per i livelli di invaso 784.50, 784.00, 783.00, 782.00 e 781.00 m s.m.m.

Nella Tabella 14 sono riportate le quote medie di prova con la relativa portata scaricata. Per ogni prova è stato calcolato il coefficiente di deflusso dello sfioratore, considerando una lunghezza dello stesso di 15.8 m (senza contrazione della vena) e una quota di sfioro di 780.82 m s.m.m. (per tener conto dell'effettiva quota riprodotta nel modello, come rilevato durante la verifica geometrica dello stesso).

Per ogni livello di prova si riportano nei prossimi paragrafi tutti i risultati delle misure eseguite.

quota teorica [m s.m.m.]	quota misurata [m s.m.m.]			portata scaricata [m ³ /s]	coefficiente di deflusso
	idrom M1	idrom M2	media M1,M2		
784.50	784.47	784.48	784.47	246.91	0.51
784.00	783.95	783.97	783.96	194.29	0.50
783.00	783.00	783.01	783.01	107.26	0.47
782.00	781.97	781.97	781.97	38.45	0.45
781.00	781.04	781.05	781.04	4.05	-

Tabella 14 - Scala delle portate: valori medi della quota di invaso durante la prova, portata scaricata, coefficiente di deflusso.

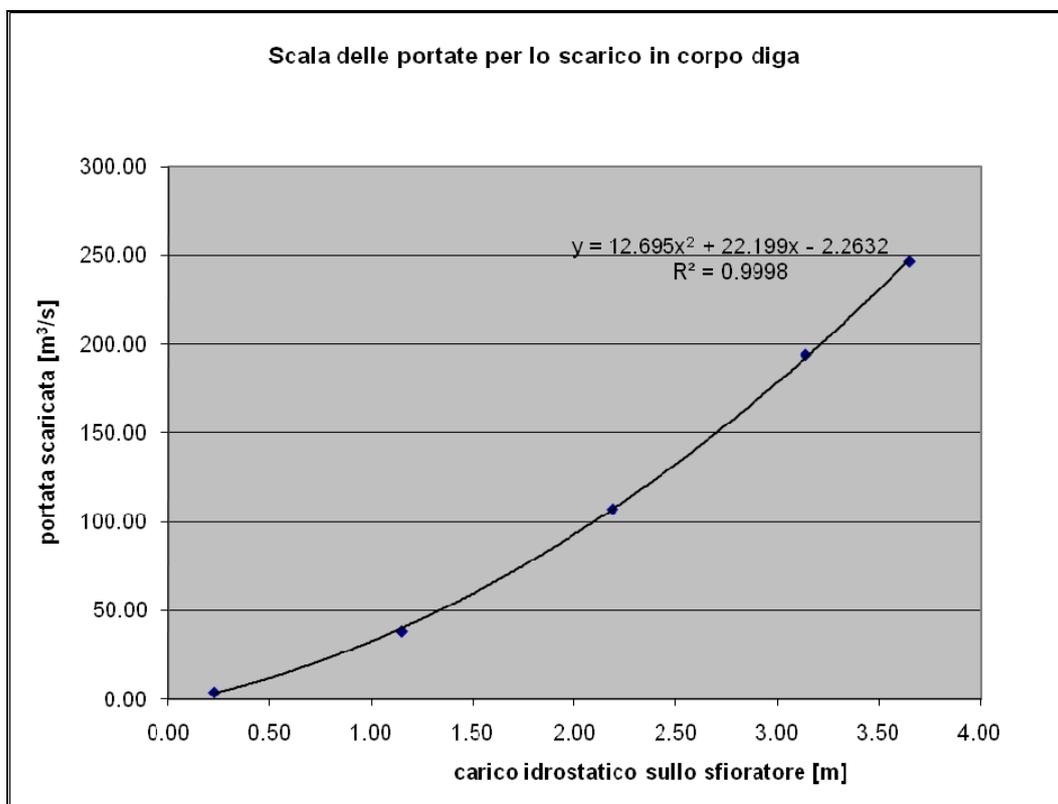


Figura 45 - Scala delle portate dello scarico in corpo diga

5.1.1. Quota di invaso 784.50 m s.m.m.

Per questa prova il deflusso appare variabile nel tempo e con qualche pulsazione; le misure dei livelli lungo lo scarico in corpo diga sono state rilevate nei loro valori massimo, minimo e medio.

Come illustrato nel grafico sottostante, a monte e valle della verticale h2 il pelo libero si porta a quote superiori di quella di sommità del muro di destra in progetto. Le foto illustrano invece il profilo medio lungo il muro di destra e il deflusso nella parte terminale del muro di sinistra.

quota invaso teorica [m s.m.m.]	quota media misurata [m s.m.m.]	portata scaricata [m³/s]
784.50	784.47	246.91

scarico in corpo diga						
verticale	tirante [m]			quota pelo libero [m s.m.m.]		
	max	min	media	max	min	media
h1	5.60	4.80	5.00	777.60	776.80	777.00
h2	5.40	4.20	4.60	768.70	767.50	767.90
h3	5.00	3.80	4.00	766.35	765.15	765.35
h4	4.20	3.40	3.60	764.53	763.73	763.93
h5	3.80	3.20	3.40	764.44	763.84	764.04
h6	3.60	3.20	3.40	765.10	764.70	764.90
h7	5.06	4.62	4.86	777.06	776.62	776.86
h8	3.86	3.54	3.70	767.16	766.84	767.00

Tabella 15 - Battenti idrici: valori massimi, minimi e medi misurati

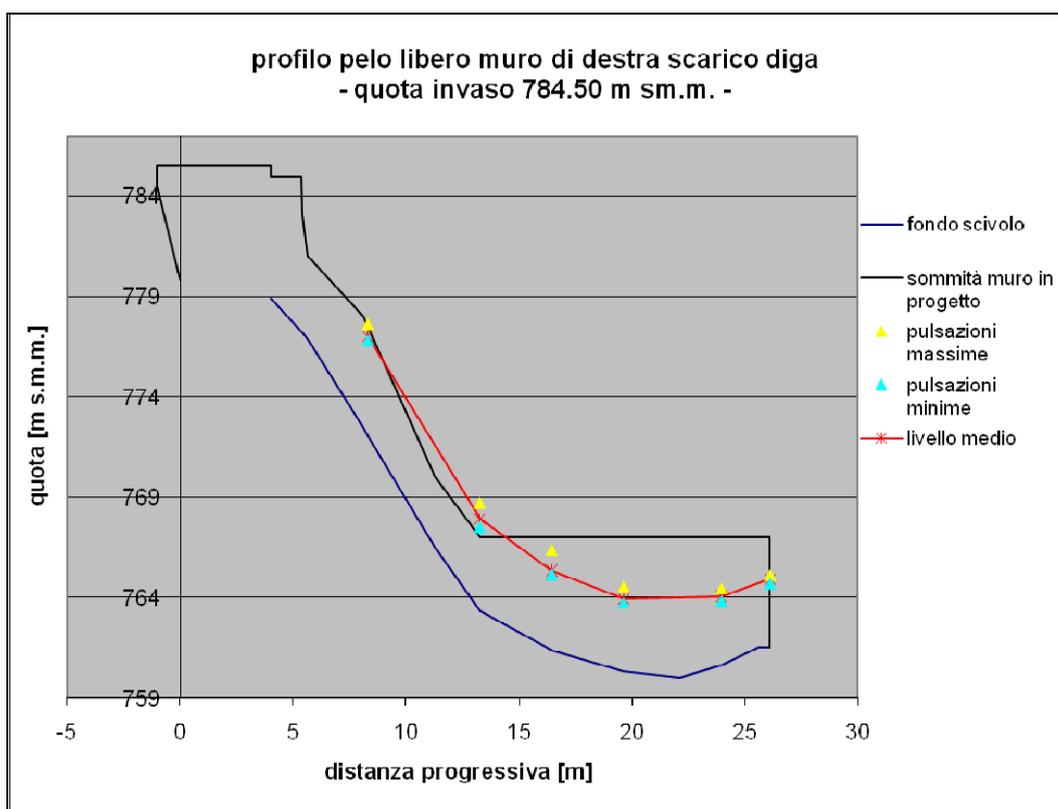
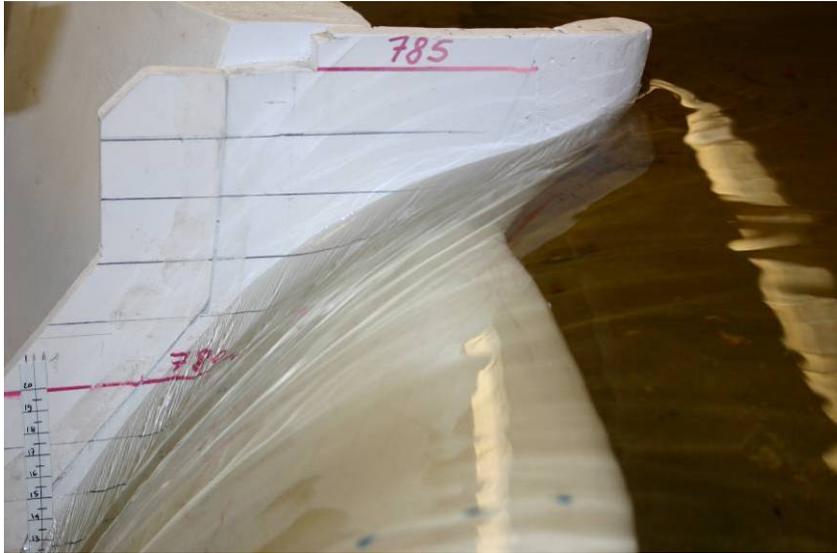


Figura 46 - Andamento pelo libero su muro di destra per la prova con quota di invaso 784.50 m s.m.m.



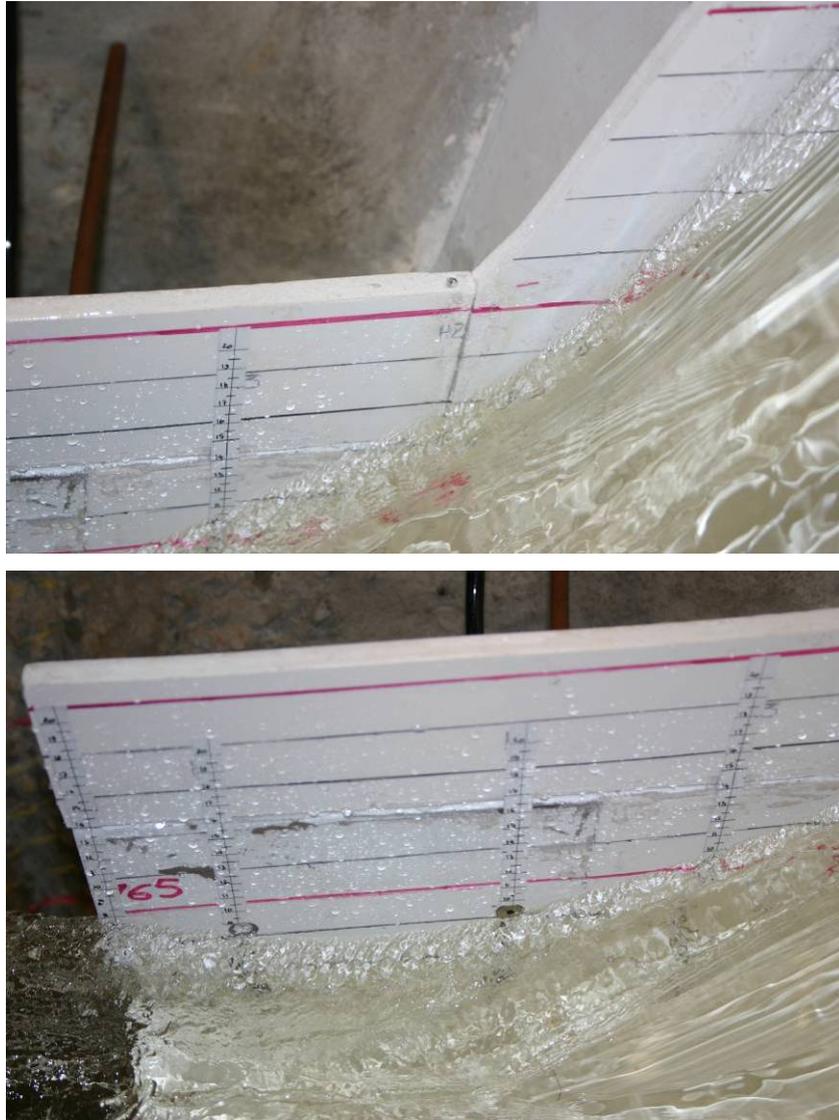


Figura 47 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di destra



Figura 48 - Pelo libero sulla parte di valle del muro di sinistra

I valori delle pressioni sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono.

Si nota una leggera depressione alle prese p2 e p3 lungo il ciglio sfiorante, giustificata dalla curvatura delle linee di corrente.

La registrazione alla presa p7 è stata fatta nonostante l'acqua lambisse quel punto. La misura ha quindi un valore indicativo.

sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	Pressione relativa [m]
p1	780.75	0.12
p2	780.53	-0.32
p3	780.00	-0.24
p4	779.15	0.20

Tabella 16 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

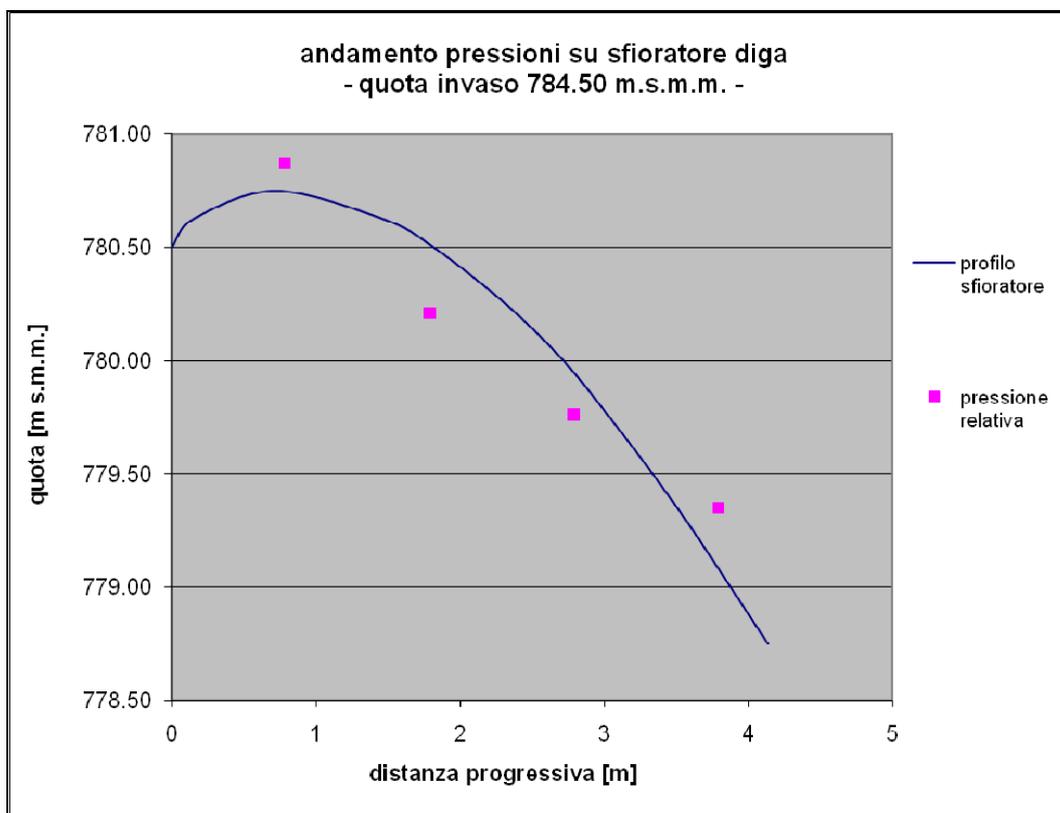


Figura 49 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

muro destra diga				
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione [m]		
		max	media	deviazione standard
p5	764.00	0.87	0.26	0.07
p6	762.00	7.58	7.17	0.12
p7	764.00	0.15	-0.04	0.09
p8	762.00	5.69	5.24	0.11

Tabella 17 - Valori massimi, medi e deviazione standard delle pressioni registrate coi sensori di pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

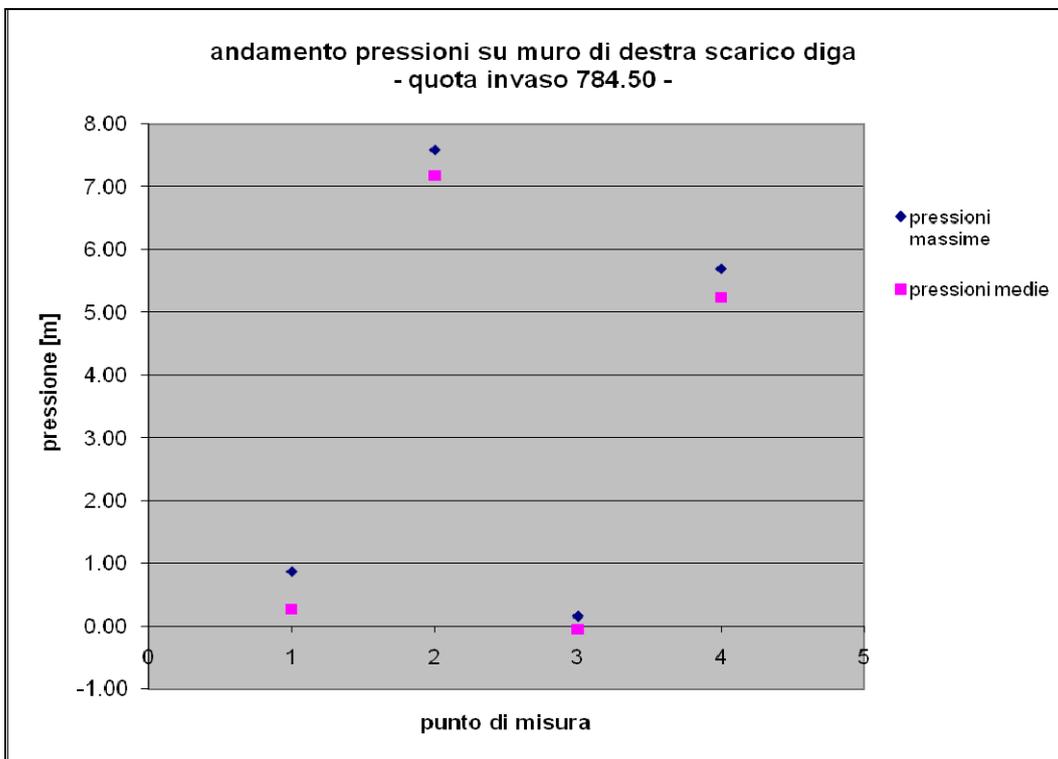
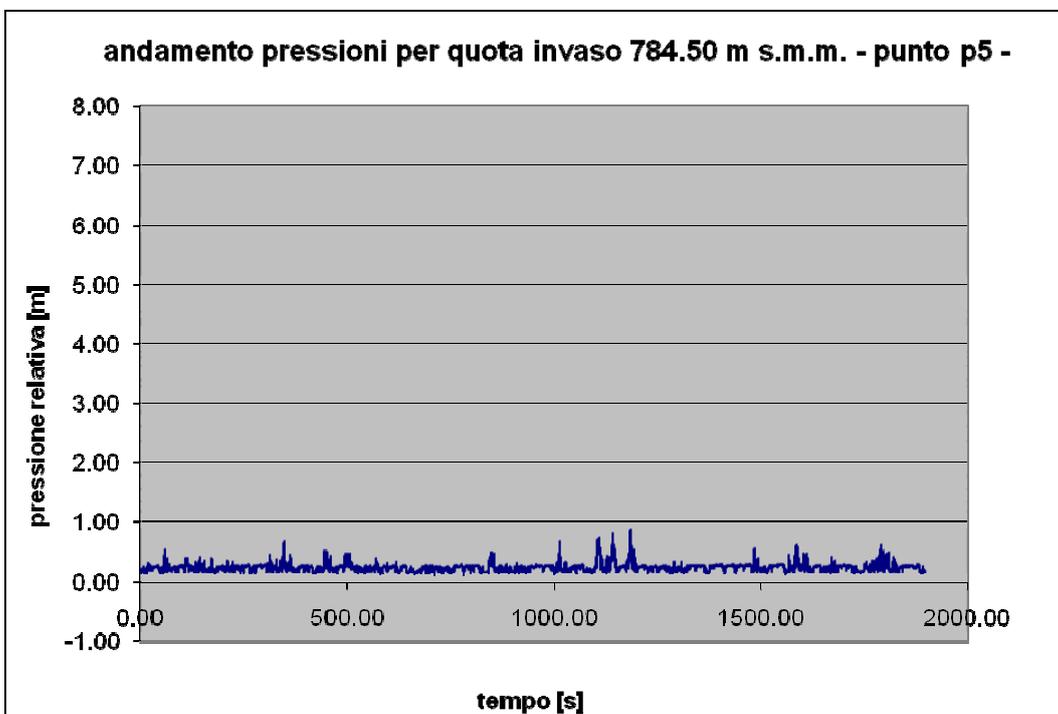
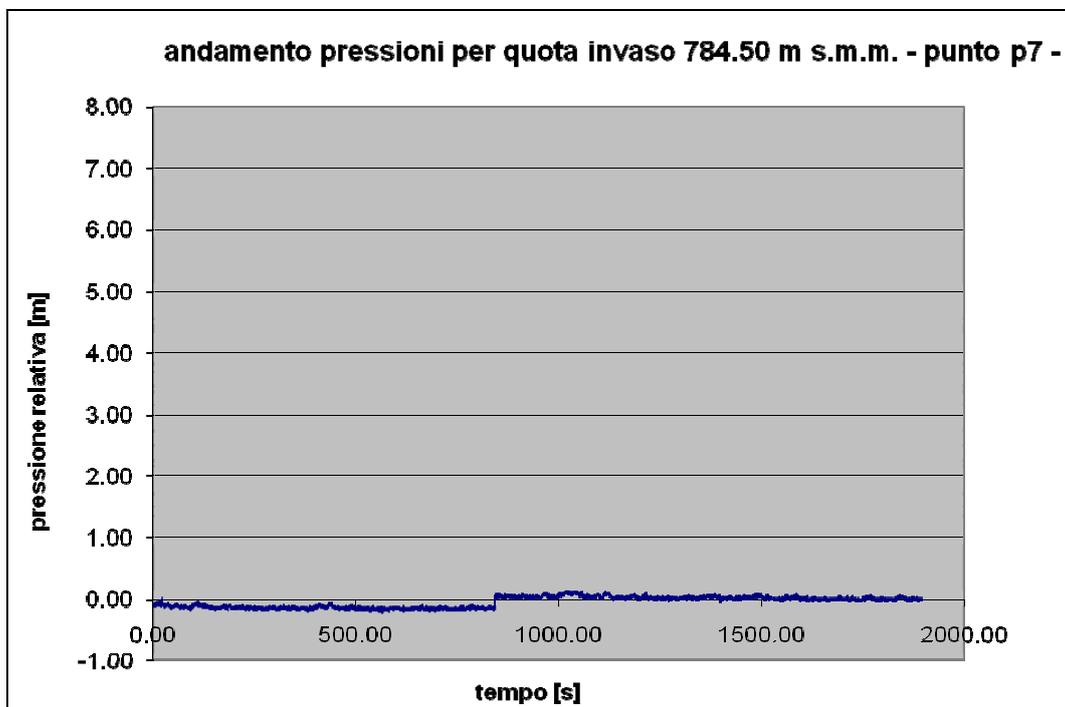
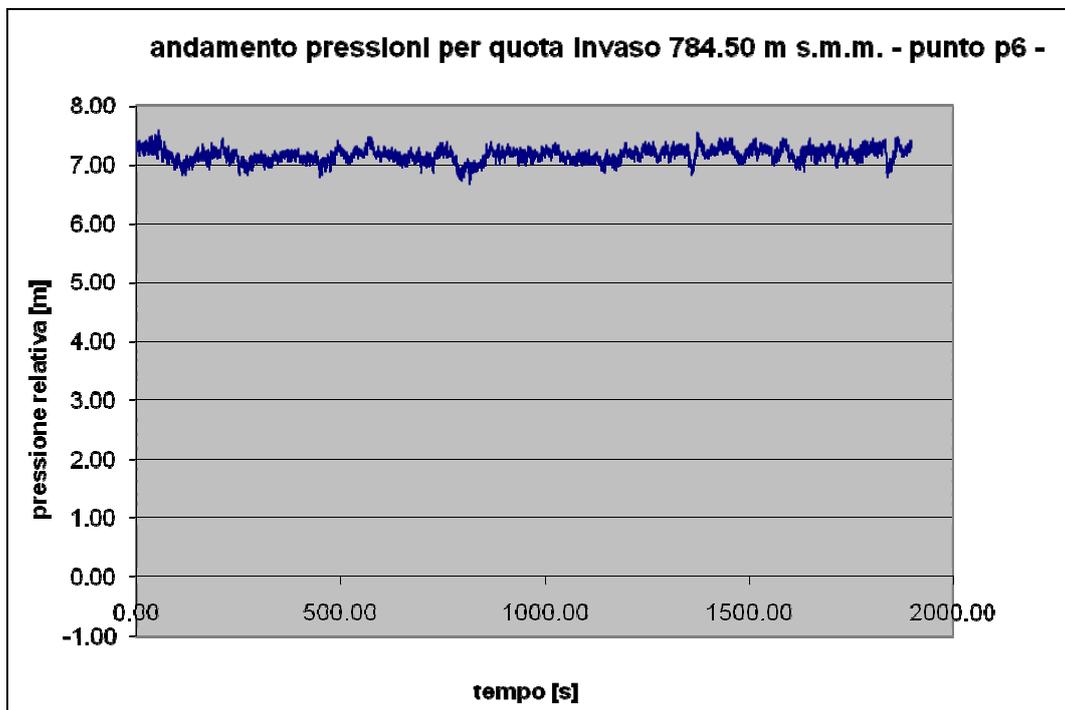


Figura 50 - Valori massimi e medi delle pressioni registrate ai punti p5-p8 (nel grafico in ascissa 1-4)





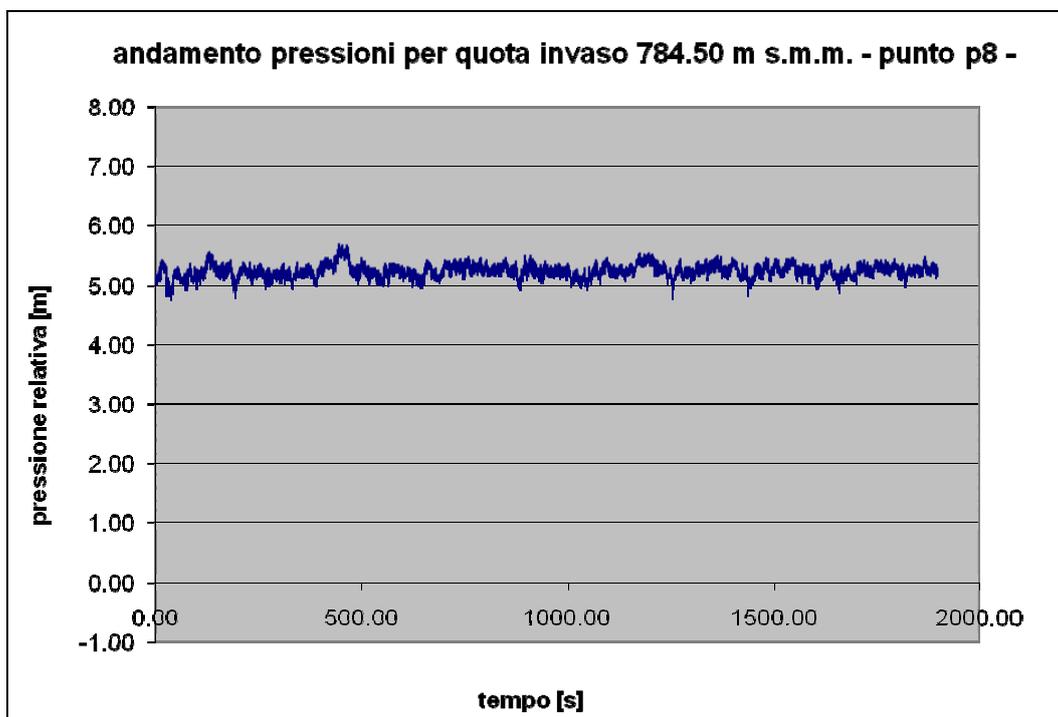


Figura 51 - Andamenti temporali delle pressioni registrate ai punti p5-p8

5.1.2. Quota di invaso 784.00 m s.m.m.

Per questa e le successive prova le misure dei livelli lungo lo scarico in corpo diga sono state rilevate solo nei loro valori medi.

Come illustrato nel grafico sottostante, a monte e valle della verticale h2 il pelo libero si trova a quote superiori di quella di sommità del muro di destra in progetto. Le foto illustrano il profilo medio lungo il muro di destra e il deflusso nella parte terminale del muro di sinistra.

quota invaso teorica [m s.m.m.]	quota media misurata [m s.m.m.]	portata scaricata [m ³ /s]
784.00	783.96	194.29

scarico in corpo diga		
verticale	tirante [m]	quota pelo libero [m s.m.m.]
h1	4.20	776.20
h2	3.60	766.90
h3	3.20	764.55
h4	3.00	763.33
h5	3.00	763.64
h6	2.80	764.30
h7	3.98	775.98
h8	2.98	766.28

Tabella 18 - Battenti idrici: valori medi misurati

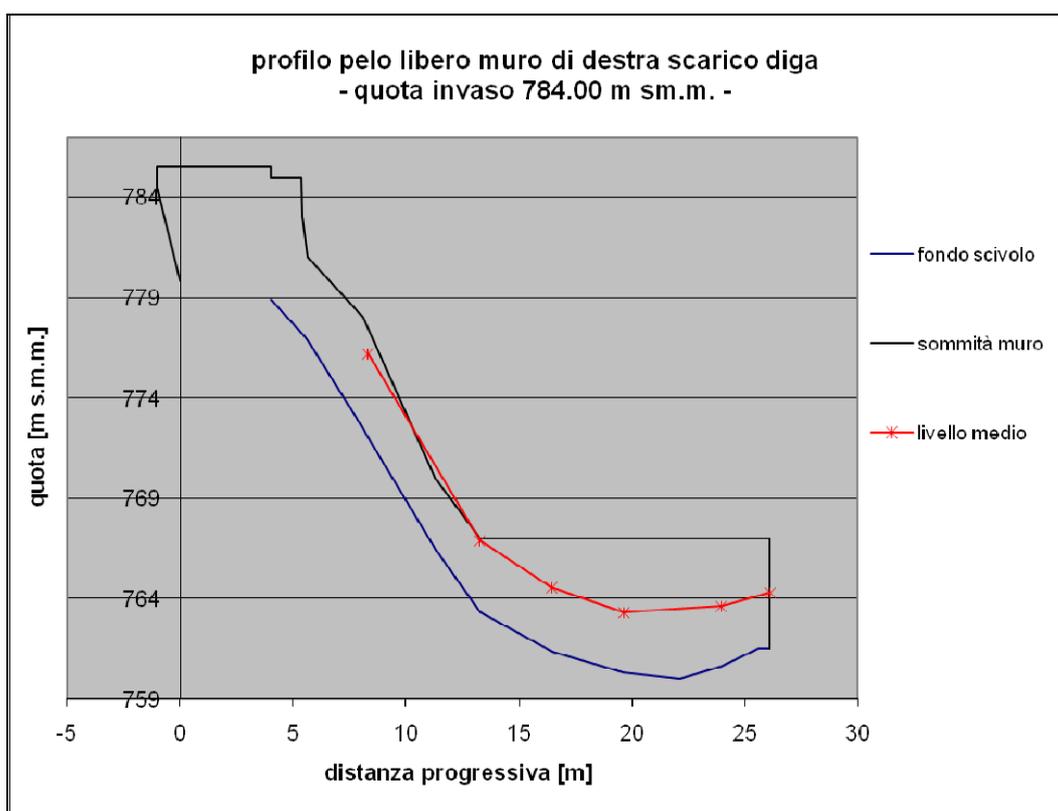
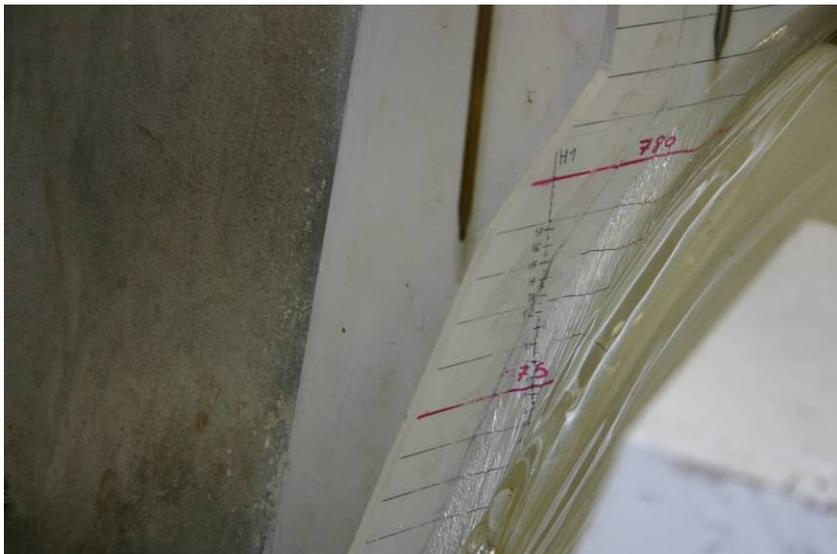


Figura 52 - Andamento pelo libero su muro di destra per la prova con quota di invaso 784.00 m s.m.m.



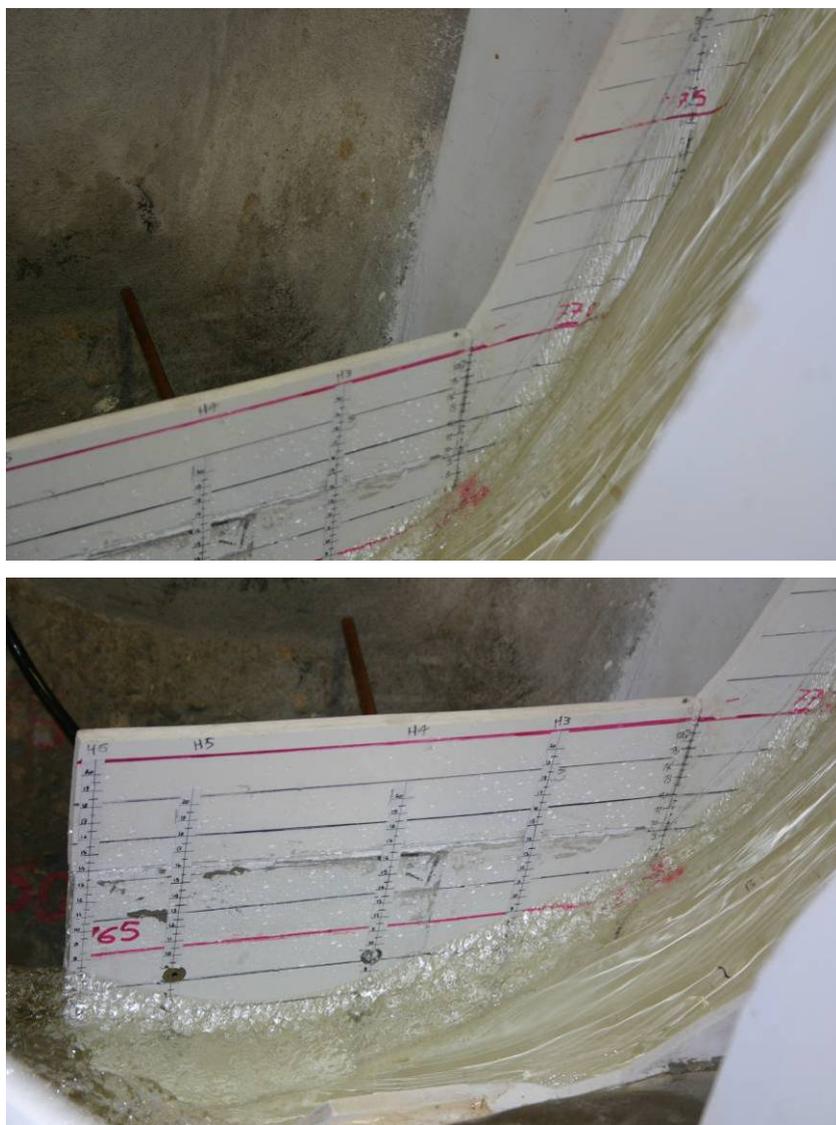


Figura 53 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di destra



Figura 54 - Pelo libero sulla parte di valle del muro di sinistra

I valori delle pressioni sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono.

Si nota ancora una leggera depressione alle prese p2 e p3 lungo il ciglio sfiorante.

Le registrazioni alle prese p5 e p7 non sono state fatte poiché il sensore non veniva mai toccato dall'acqua.

sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	Pressione relativa [m]
p1	780.75	0.36
p2	780.53	-0.12
p3	780.00	-0.08
p4	779.15	0.24

Tabella 19 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

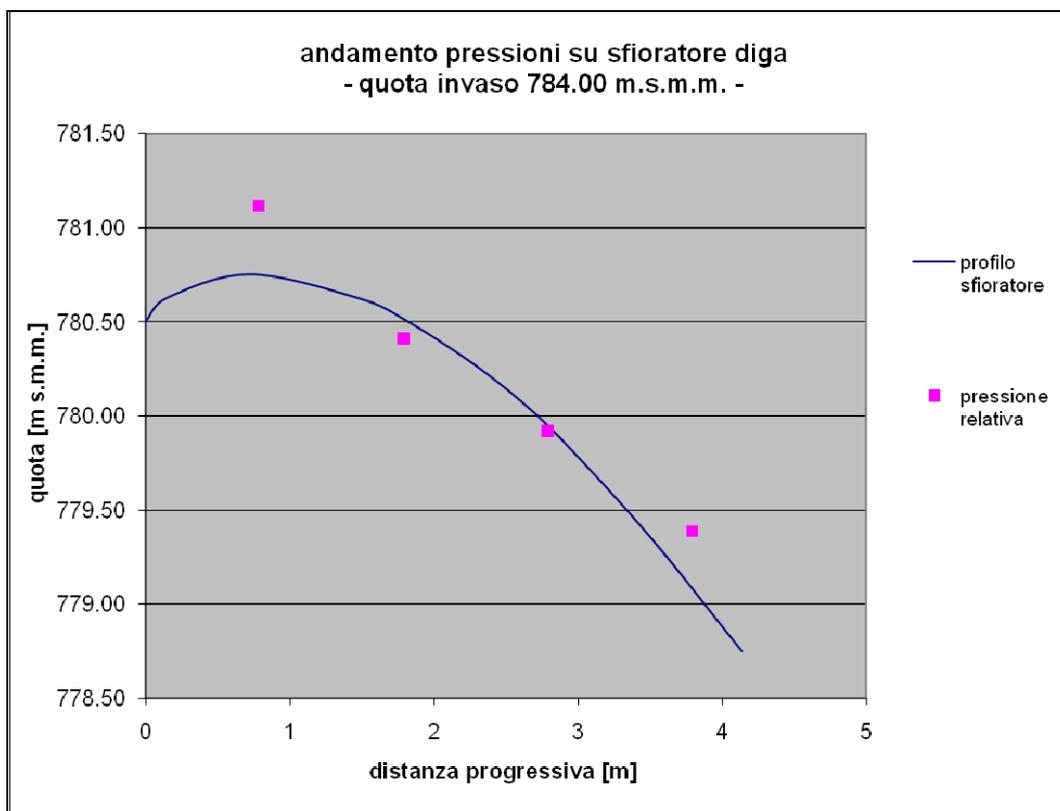


Figura 55 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

muro destra diga				
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione [m]		
		max	media	deviazione standard
p5	764.00	/	/	/
p6	762.00	5.44	4.96	0.12
p7	764.00	/	/	/
p8	762.00	4.14	3.68	0.13

Tabella 20 - Valori massimi, medi e deviazione standard delle pressioni registrate coi sensori di pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

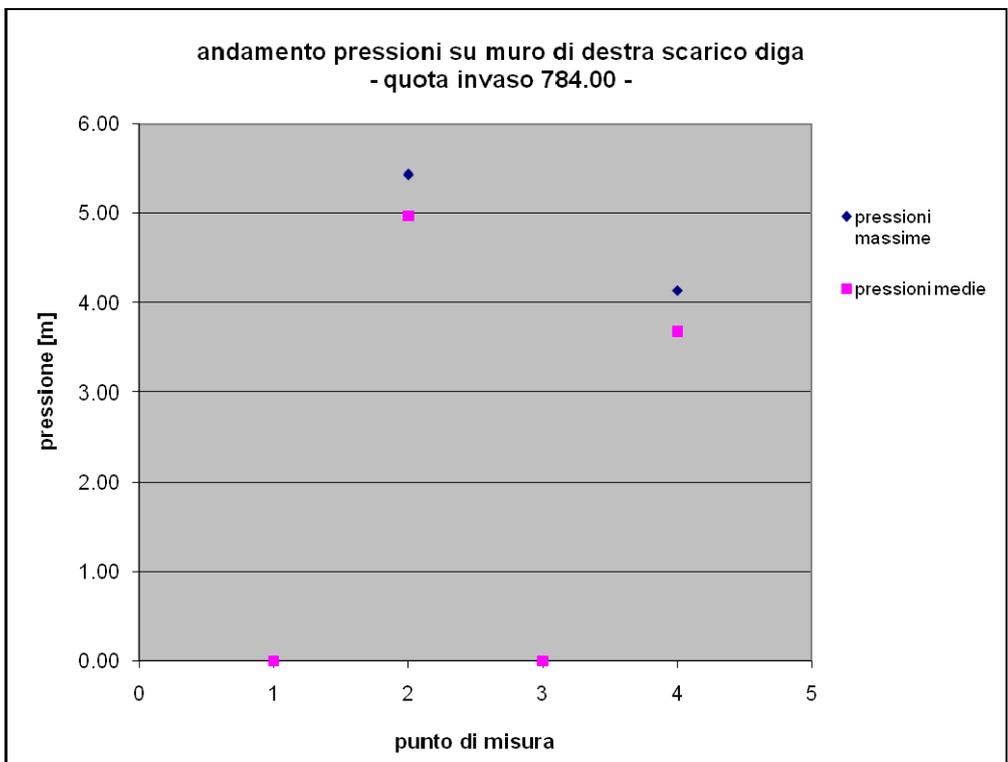
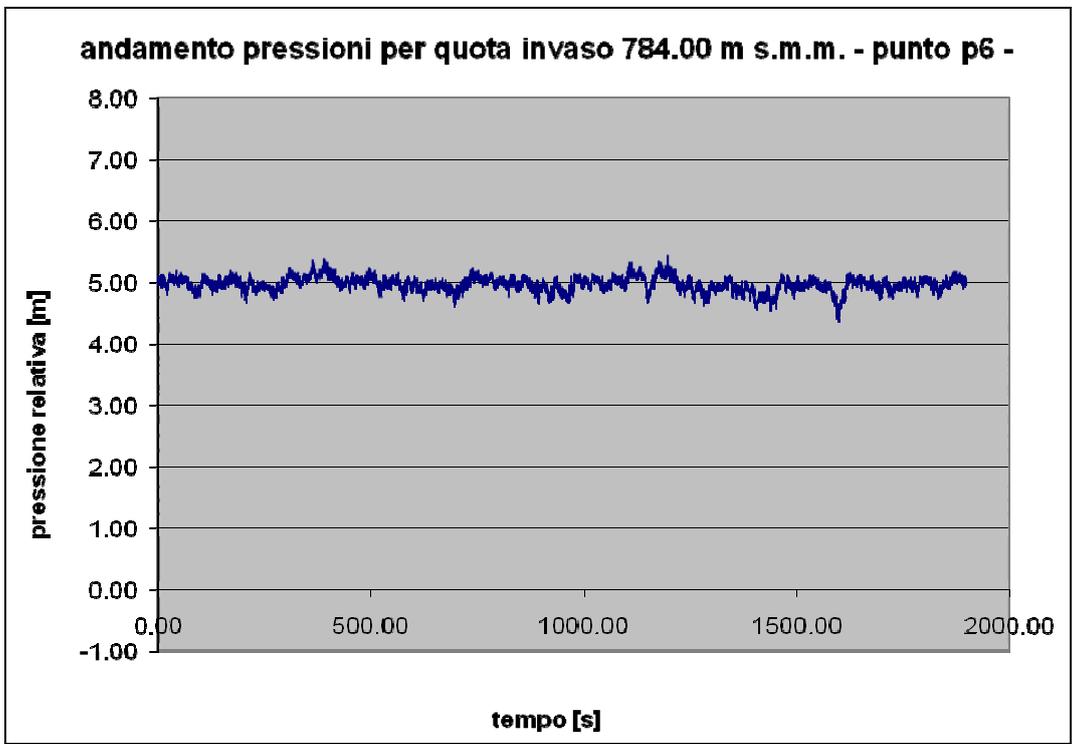


Figura 56 - Valori massimi e medi delle pressioni registrate ai punti p6 e p8 (nel grafico in ascissa 2 e 4)



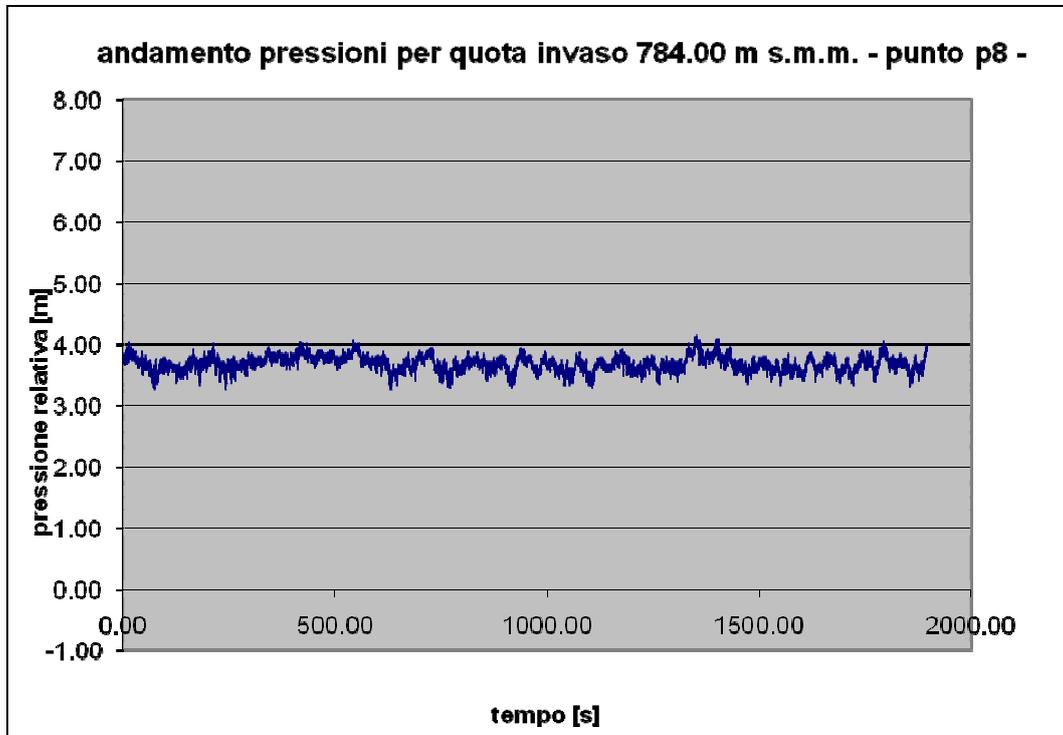


Figura 57 - Andamenti temporali delle pressioni registrate ai punti p6 e p8

5.1.3. Quota di invaso 783.00 m s.m.m.

Il deflusso è interamente contenuto all'interno dei muri che delimitano lo scivolo di scarico in corpo diga, come ben si nota in Figura 59.

quota invaso teorica [m s.m.m.]	quota media misurata [m s.m.m.]	portata scaricata [m ³ /s]
783.00	783.01	107.26

scarico in corpo diga		
verticale	tirante [m]	quota pelo libero [m s.m.m.]
h1	2.80	774.80
h2	1.80	765.10
h3	2.00	763.35
h4	2.40	762.73
h5	2.20	762.84
h6	2.20	763.70
h7	2.42	774.42
h8	1.98	765.28

Figura 58 - Battenti idrici: valori medi misurati

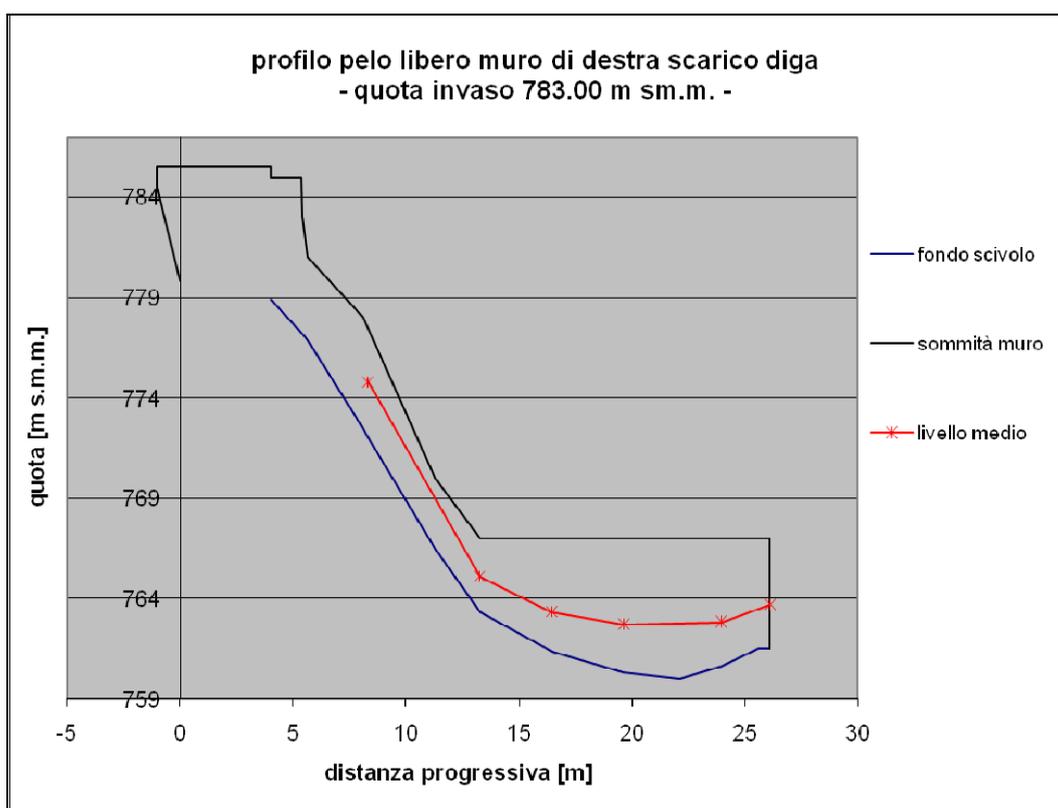
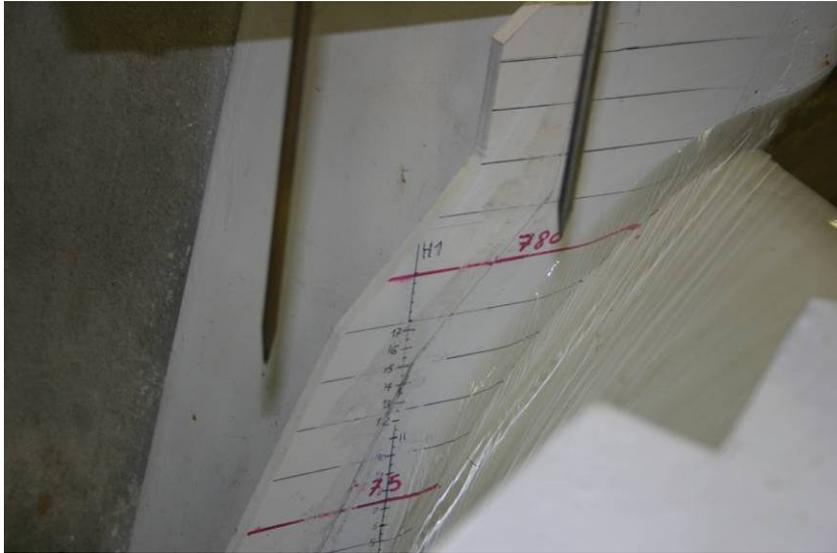


Figura 59 - Andamento pelo libero su muro di destra per la prova con quota di invaso 783.00 m s.m.m.



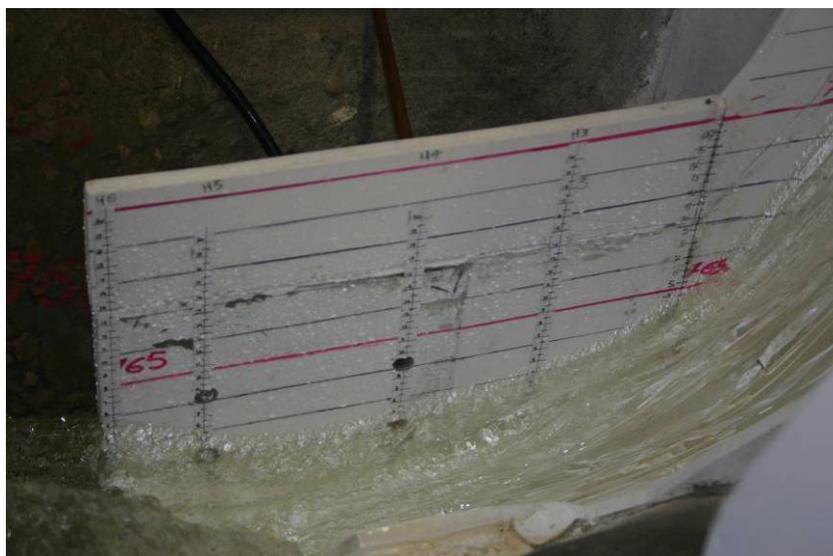


Figura 60 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di destra



Figura 61 - Pelo libero sulla parte di valle del muro di sinistra

I valori delle pressioni sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono.

Lungo il ciglio sfiorante tutte le pressioni relative sono positive.

Le registrazioni alle prese p5 e p7 non sono state fatte poiché il sensore non veniva mai toccato dall'acqua.

sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	Pressione relativa [m]
p1	780.75	0.64
p2	780.53	0.20
p3	780.00	0.08
p4	779.15	0.32

Tabella 21 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

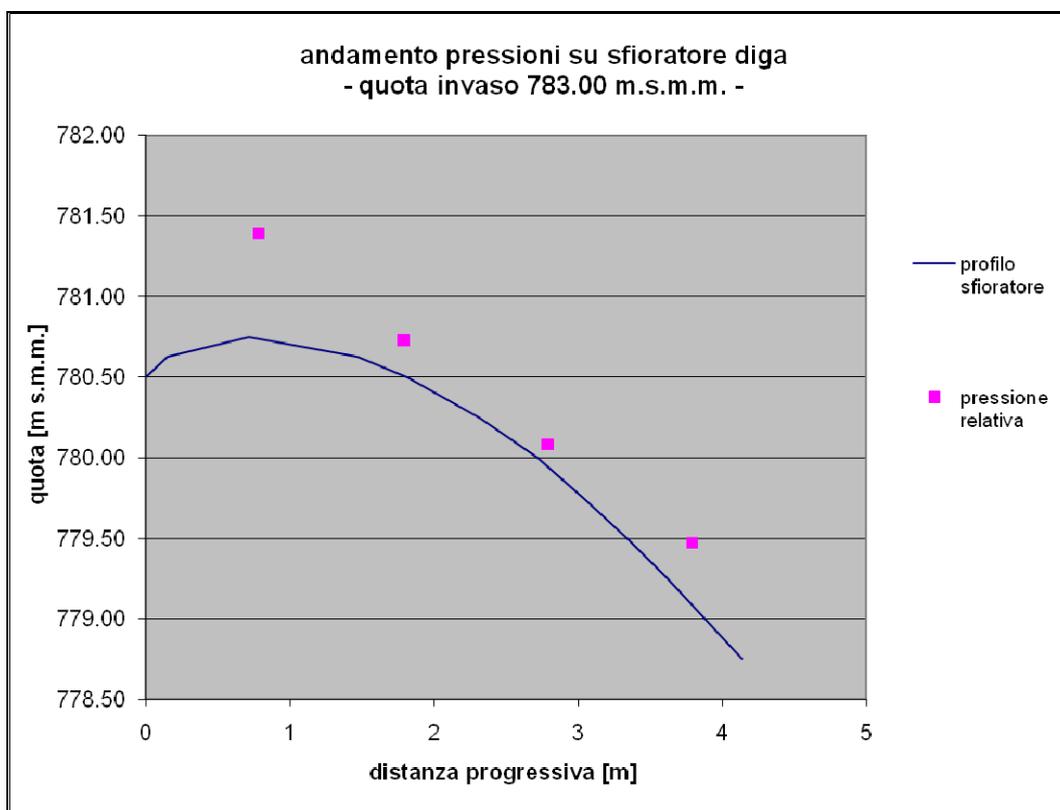


Figura 62 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

muro destra diga				
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione [m]		
		max	media	deviazione standard
p5	764.00	/	/	/
p6	762.00	2.15	1.76	0.11
p7	764.00	/	/	/
p8	762.00	1.77	1.41	0.11

Tabella 22 - Valori massimi, medi e deviazione standard delle pressioni registrate coi sensori di pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

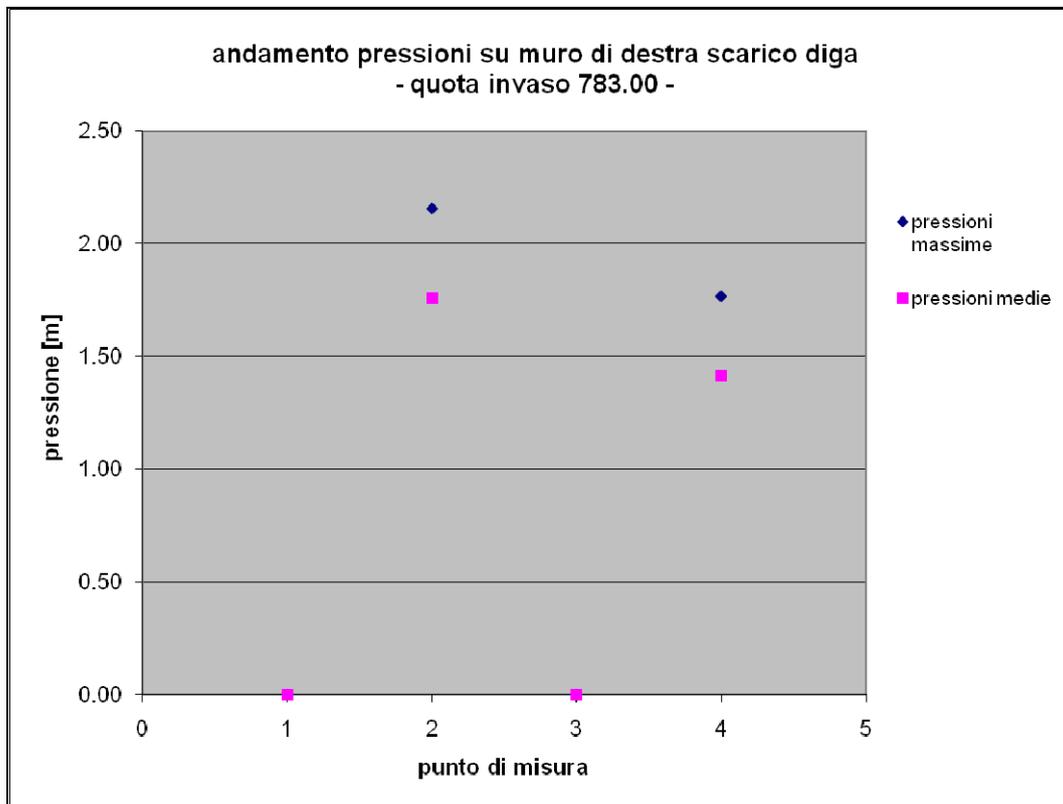


Figura 63 - Valori massimi e medi delle pressioni registrate ai punti p6 e p8 (nel grafico in ascissa 2 e 4)

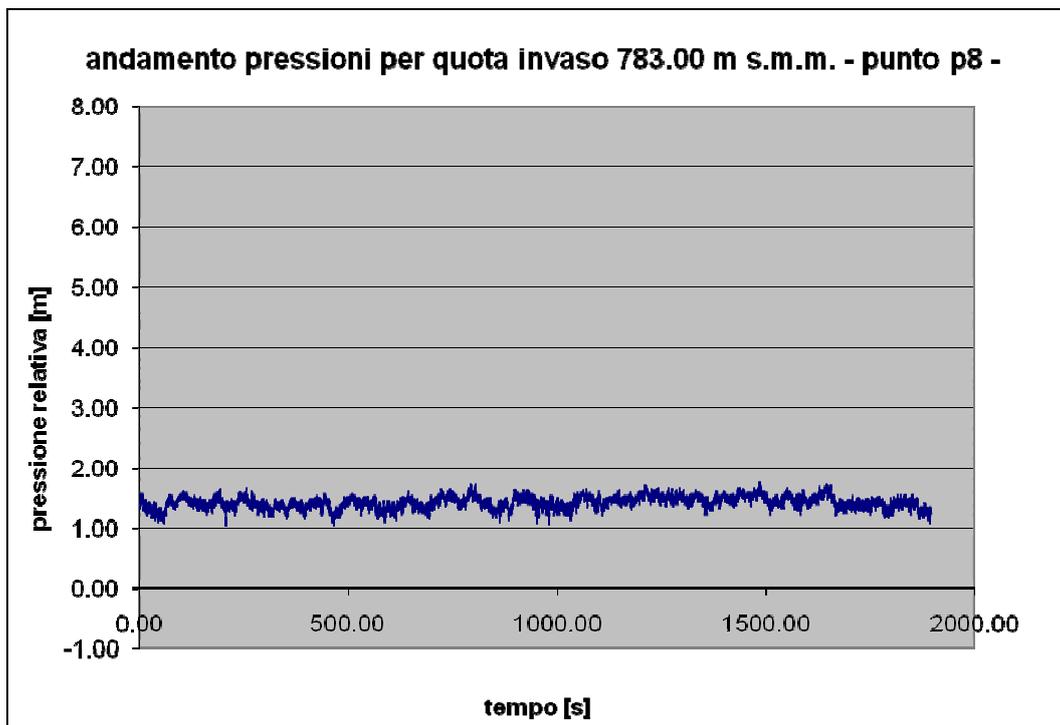
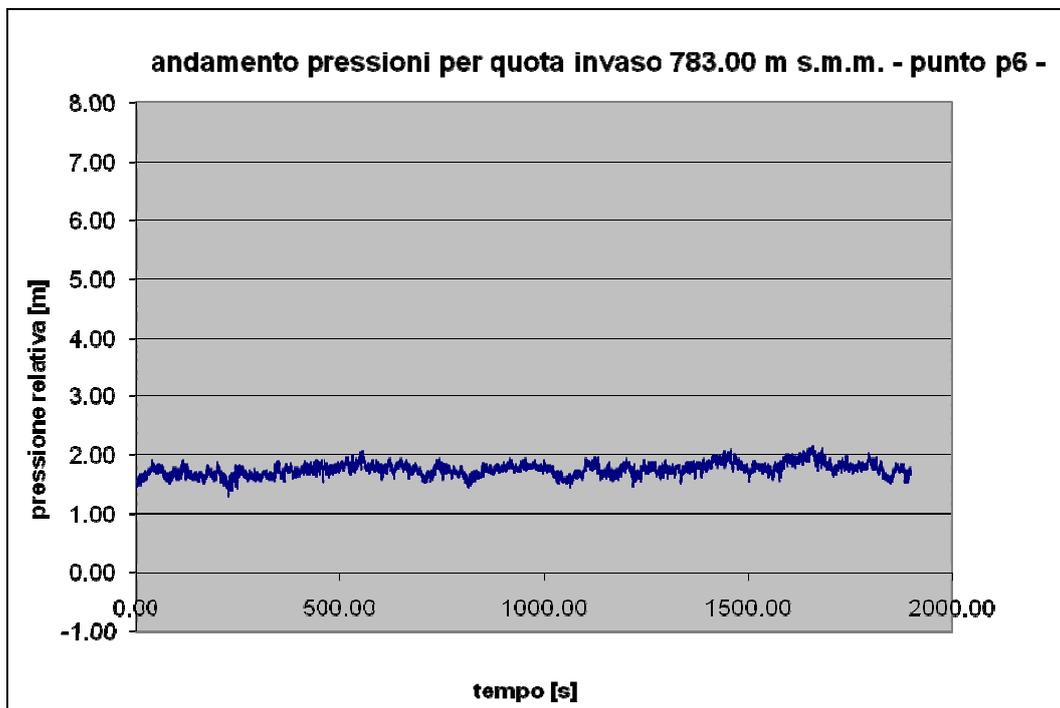


Figura 64 - Andamenti temporali delle pressioni registrate ai punti p6 e p8

5.1.4. Quota di invaso 782.00 m s.m.m.

quota invaso teorica [m s.m.m.]	quota media misurata [m s.m.m.]	portata scaricata [m ³ /s]
782.00	781.97	38.45

scarico in corpo diga		
verticale	tirante [m]	quota pelo libero [m s.m.m.]
h1	1.40	773.40
h2	0.80	764.10
h3	0.60	761.95
h4	1.40	761.73
h5	1.60	762.24
h6	1.60	763.10
h7	0.98	772.98
h8	1.14	764.44

Tabella 23 - Battenti idrici: valori medi misurati

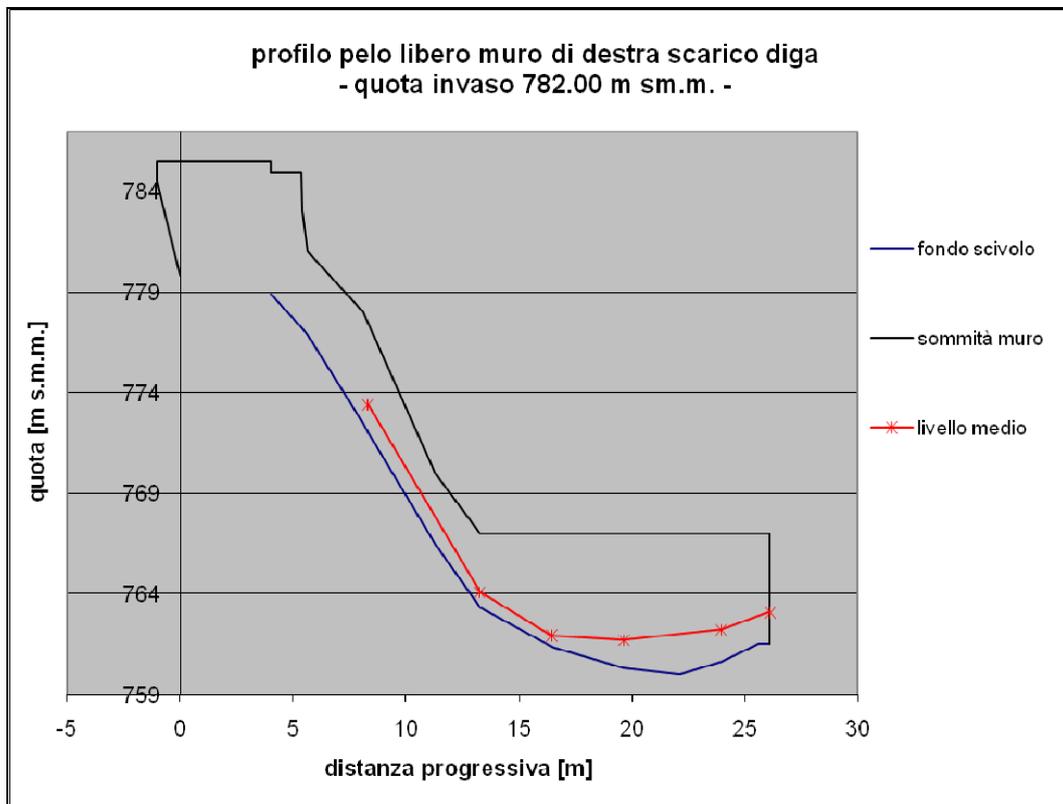


Figura 65 - Andamento pelo libero su muro di destra per la prova con quota di invaso 782.00 m s.m.m.



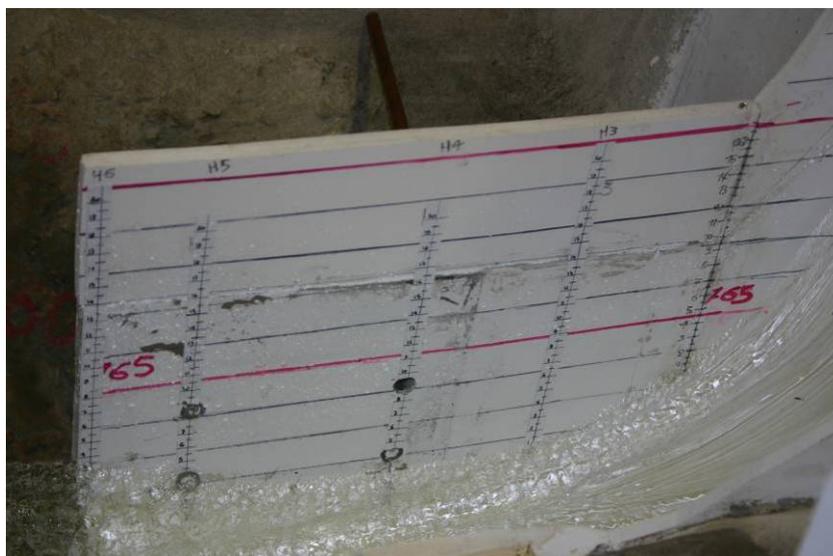


Figura 66 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di destra



Figura 67 - Pelo libero sulla parte di valle del muro di sinistra

I valori delle pressioni sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono.

Lungo il ciglio sfiorante tutte le pressioni relative sono positive.

Le registrazioni con il sensore di pressione sono state fatte solo per la presa p8 poiché unica toccata dall'acqua.

sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	Pressione relativa [m]
p1	780.75	0.56
p2	780.53	0.20
p3	780.00	0.08
p4	779.15	0.20

Tabella 24 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

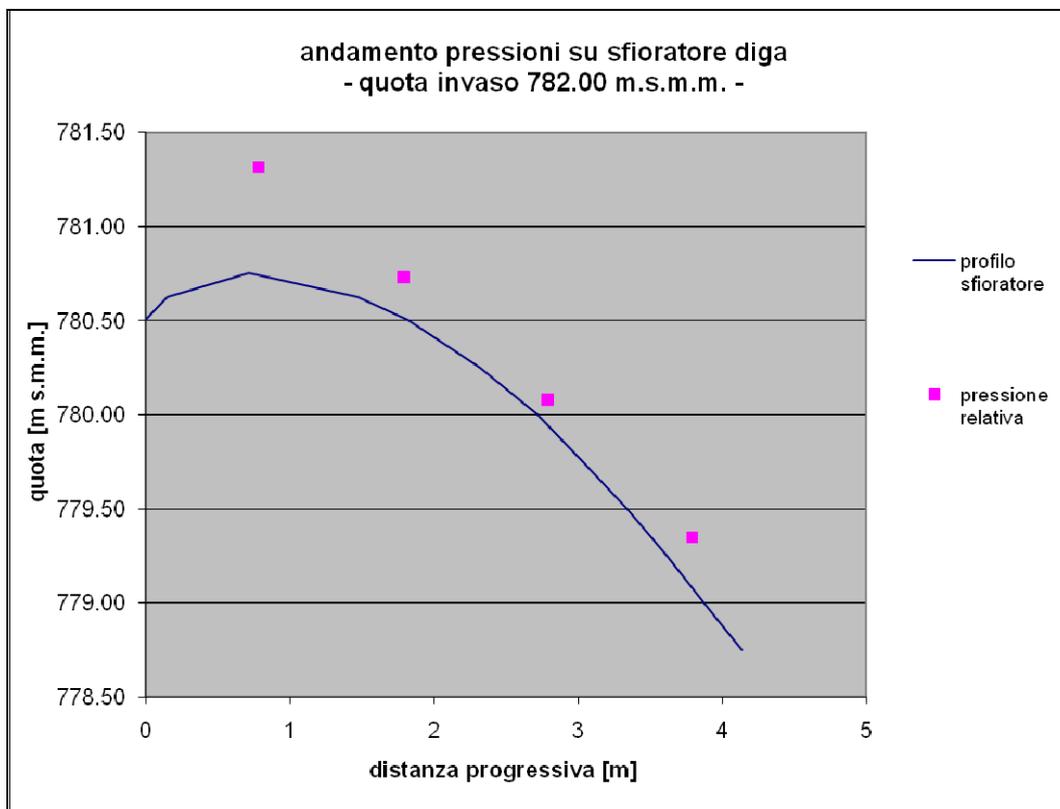


Figura 68 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

muro destra diga				
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	pressione [m]		
		max	media	deviazione standard
p5	764.00	/	/	/
p6	762.00	/	/	/
p7	764.00	/	/	/
p8	762.00	0.56	0.34	0.05

Tabella 25 - Valori massimi, medi e deviazione standard delle pressioni registrate coi sensori di pressione sul muro di destra dello scarico in corpo diga

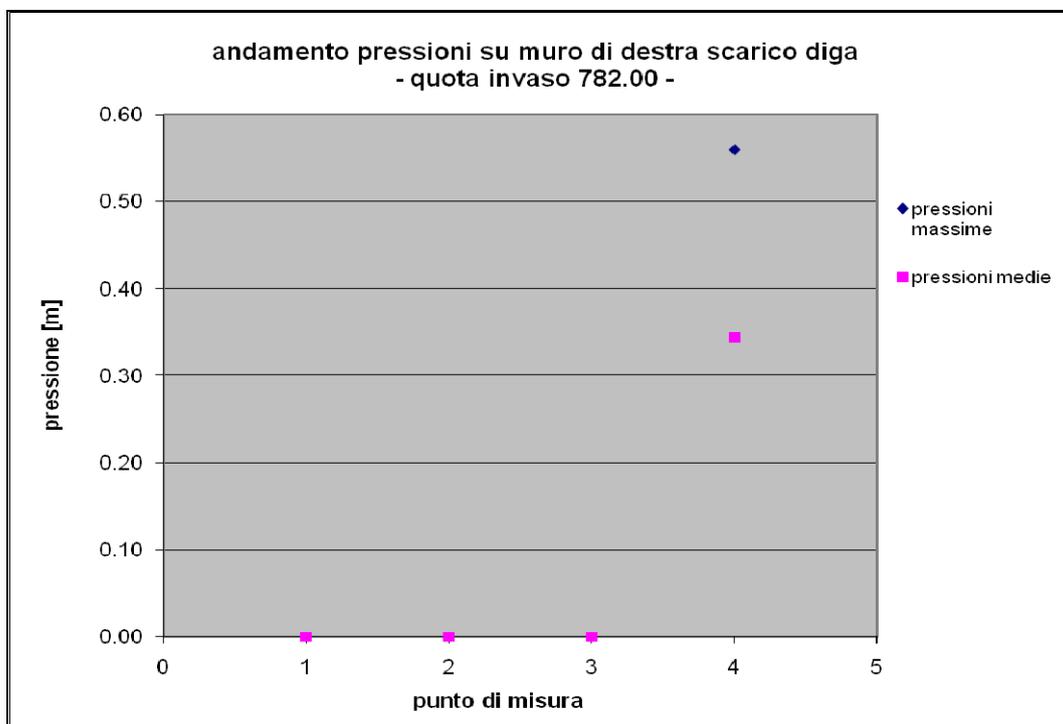


Figura 69 - Valore massimo e medio delle pressioni registrate al punto p8 (nel grafico in ascissa 4)

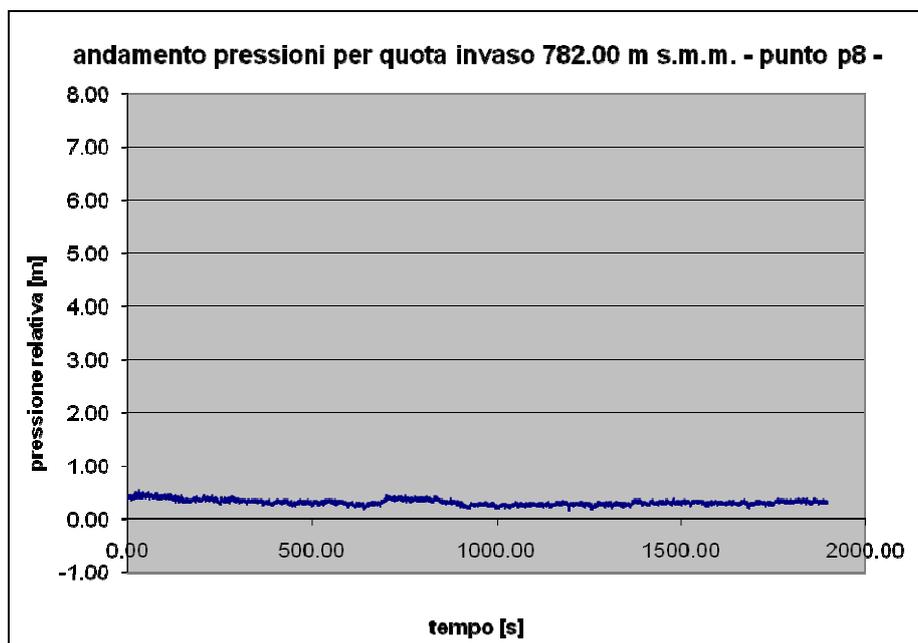


Figura 70 - Andamento temporale delle pressioni registrate al punto p8

5.1.5. Quota di invaso 781.00 m s.m.m.

quota invaso teorica [m s.m.m.]	quota media misurata [m s.m.m.]	portata scaricata [m ³ /s]
781.00	781.04	4.05

scarico in corpo diga		
verticale	tirante [m]	quota pelo libero [m s.m.m.]
h1	0.20	772.20
h2	0.20	763.50
h3	0.20	761.55
h4	1.40	761.73
h5	1.20	761.84
h6	0.40	761.90
h7	0.64	772.64
h8	0.58	763.88

Tabella 26 - Battenti idrici: valori medi misurati

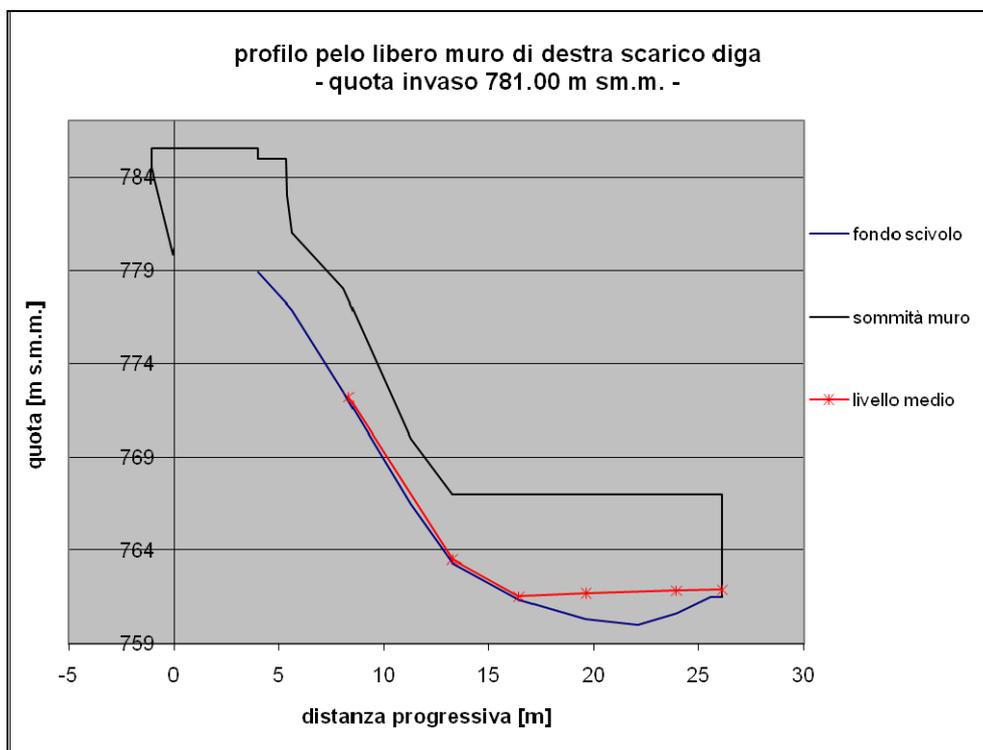


Figura 71 - Andamento pelo libero su muro di destra per la prova con quota di invaso 781.00 m s.m.m.





Figura 72 - Rilievo fotografico del pelo libero sul muro di destra

I valori delle pressioni sono riportati nelle tabelle e nei grafici che seguono.

Lungo il ciglio sfiorante tutte le pressioni sono prossime a zero; nel modello la vena d'acqua sullo scarico era molto sottile e ciò ha reso più incerte le misure con le prese di pressione.

Le registrazioni con il sensore di pressione non sono state fatte poiché nessuna presa veniva toccata dall'acqua.

sfioratore diga		
presa n°	quota presa [m s.m.m.]	Pressione relativa [m]
p1	780.75	0.00
p2	780.53	-0.08
p3	780.00	0.04
p4	779.15	0.08

Tabella 27 - Valore della pressione lungo l'asse del profilo di sfioro del nuovo scarico in corpo diga

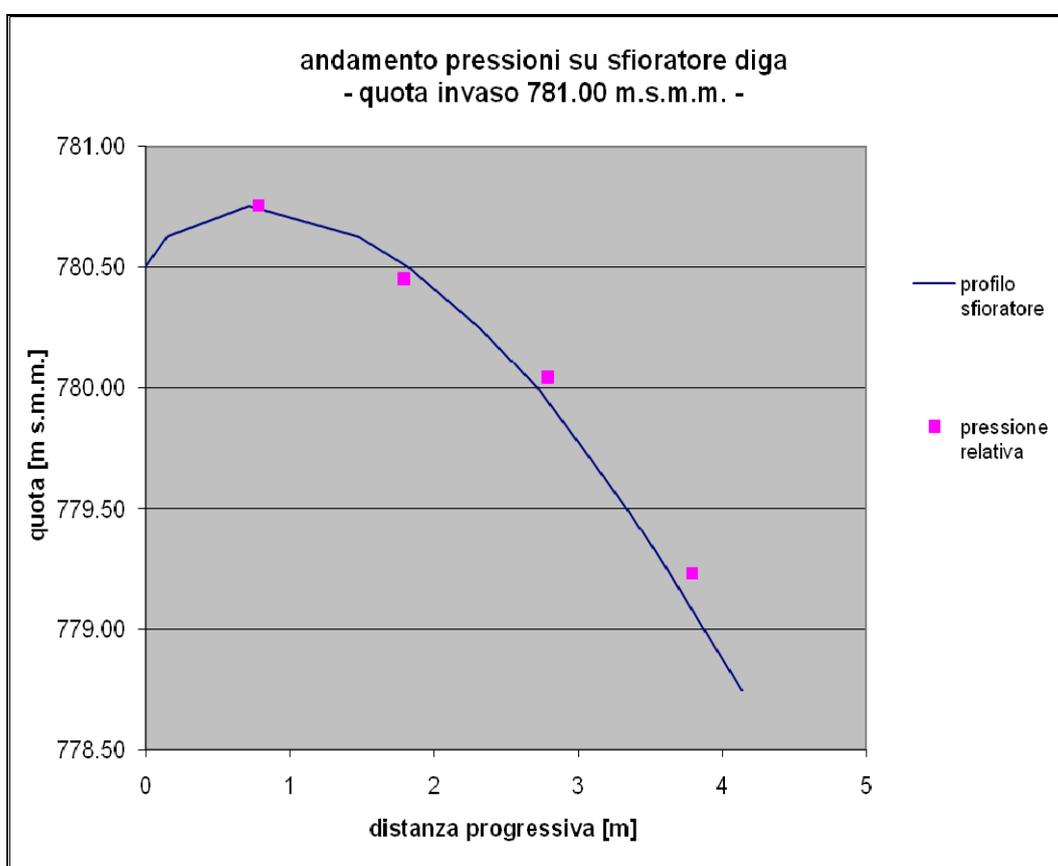


Figura 73 - Pressioni rilevate lungo il profilo di sfioro in corpo diga

5.1.6. Sintesi dei dati rilevati nelle prove per la determinazione della scala delle portate

Di seguito si riportano in una tabella riassuntiva i valori medi di tutte le misure effettuate per le varie prove della scala delle portate.

Per un confronto visivo veloce, si illustrano in un unico grafico i profili del pelo libero sul muro di destra (Tabella 28), l'andamento delle pressioni sul ciglio sfiorante (Figura 75) e l'andamento delle pressioni massime e medie sul muro di destra (Figura 76 e Figura 77).

quota invaso [m s.m.m.]	784.50	784.00	783.00	782.00	781.00
quota invaso media misurata [m s.m.m.]	784.47	783.96	783.01	781.97	781.04
portata scaricata [m ³ /s]	246.91	194.29	107.26	38.45	4.05
quote medie pelo libero [m s.m.m.]					
h1	777.00	776.20	774.80	773.40	772.20
h2	767.90	766.90	765.10	764.10	763.50
h3	765.35	764.55	763.35	761.95	761.55
h4	763.93	763.33	762.73	761.73	761.73
h5	764.04	763.64	762.84	762.24	761.84
h6	764.90	764.30	763.70	763.10	761.90
h7	776.86	775.98	774.42	772.98	772.64
h8	767.00	766.28	765.28	764.44	763.88
pressioni relative medie [mH ₂ O]					
p1	0.12	0.36	0.64	0.56	0.00
p2	-0.32	-0.12	0.20	0.20	-0.08
p3	-0.24	-0.08	0.08	0.08	0.04
p4	0.20	0.24	0.32	0.20	0.08
p5	0.26	/	/	/	/
p6	7.17	4.96	1.76	/	/
p7	-0.04	/	/	/	/
p8	5.24	3.68	1.41	0.34	/

Tabella 28 – sintesi dei dati rilevati nelle prove di scala delle portate

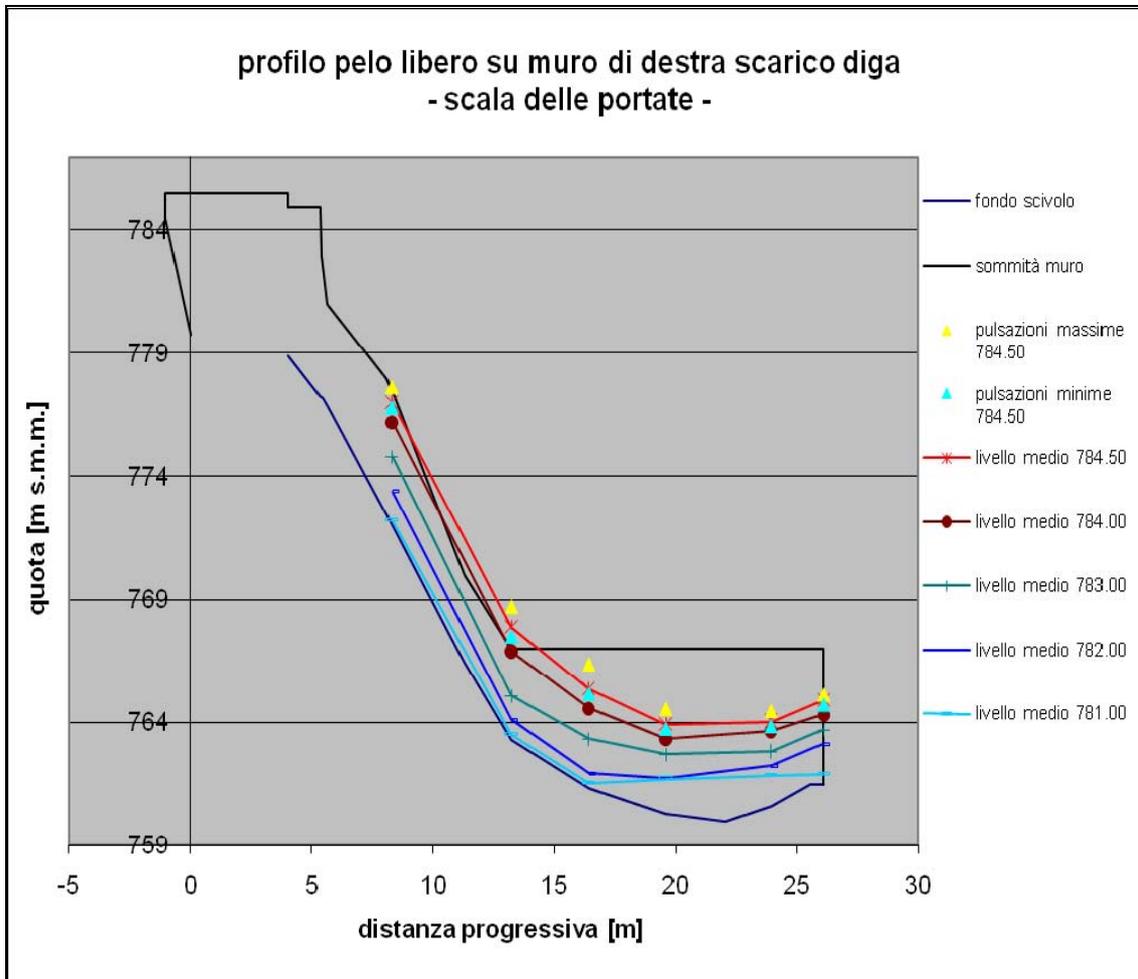


Figura 74 – Andamento pelo libero sul muro di destra dello scarico in corpo diga al variare del livello di
invaso

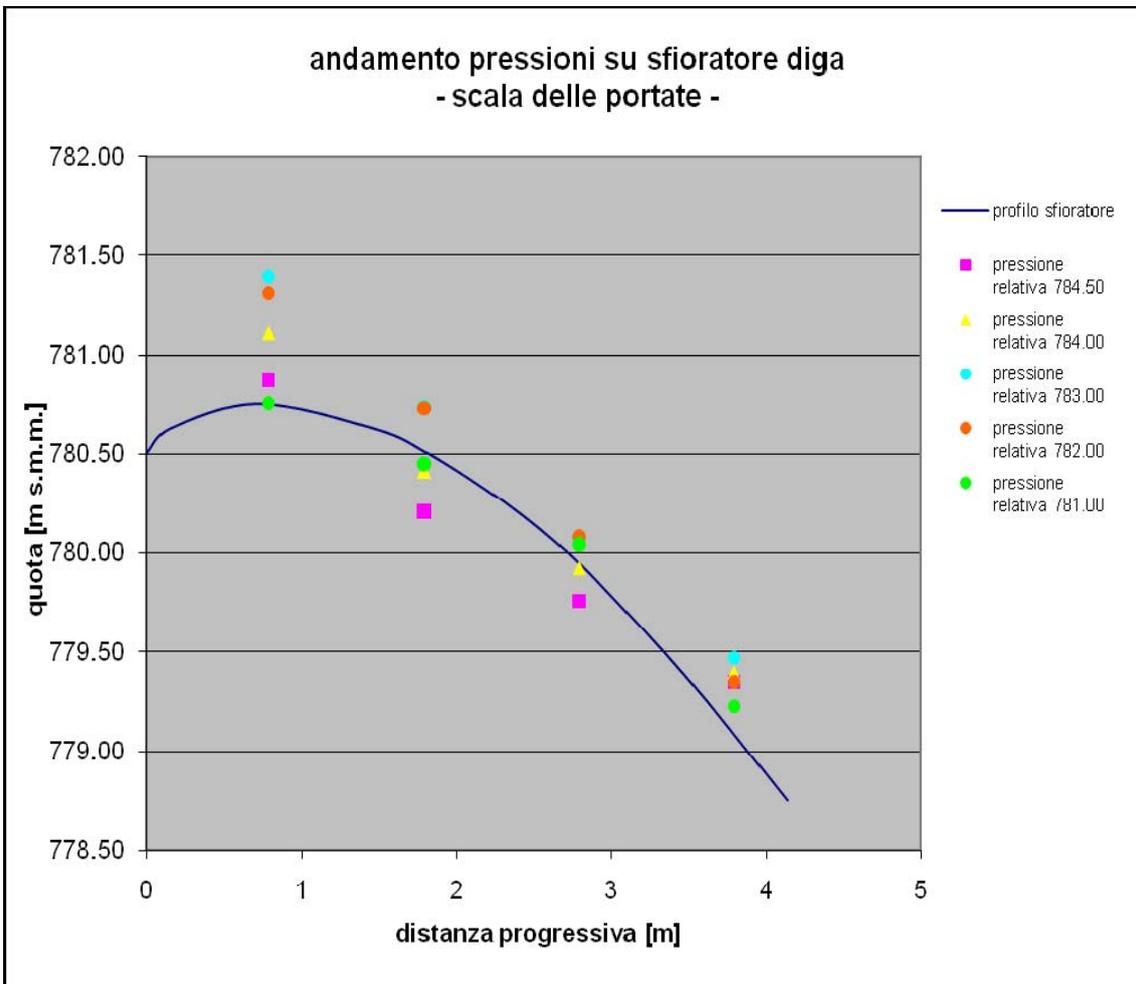


Figura 75 - Andamento delle pressioni sul ciglio di sfioro al variare del livello di invaso

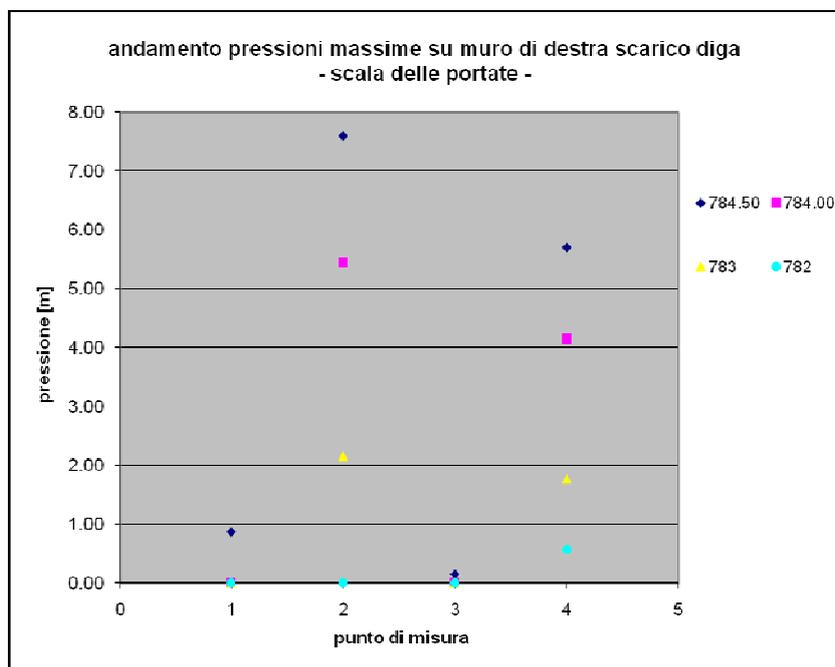


Figura 76 – Andamento delle pressioni massime sul muro di destra al variare del livello di invaso; i punti di misura da p5 a p8 corrispondono nel grafico alle ascisse da 1 a 4

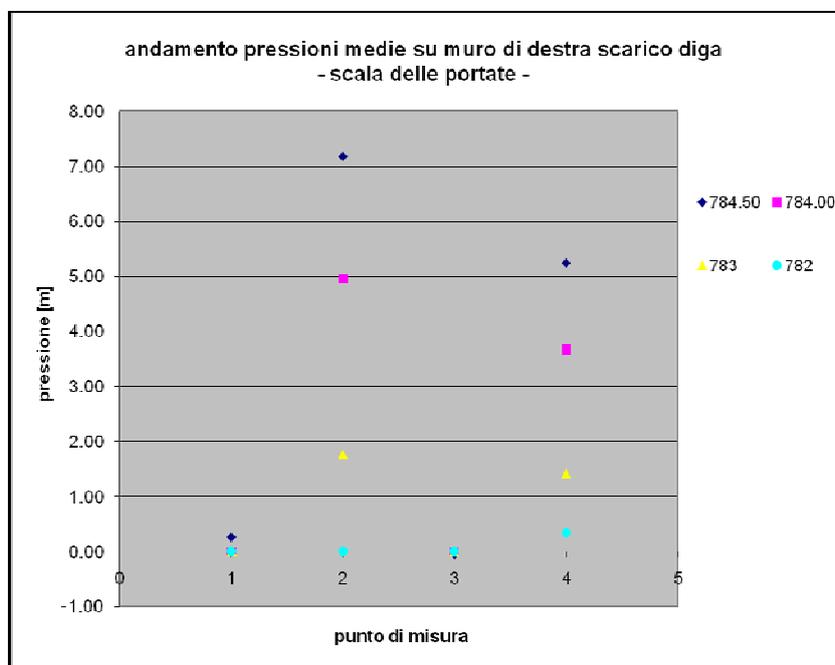


Figura 77 – Andamento delle pressioni medie sul muro di destra al variare del livello di invaso; i punti di misura da p5 a p8 corrispondono nel grafico alle ascisse da 1 a 4

6. CONCLUSIONI

Il modello fisico dell'adeguamento dello scarico di superficie della diga di Ceppo Morelli è stato previsto per verificare il progetto di risistemazione del manufatto al fine di permettere l'allontanamento a valle della rivalutata piena millenaria del torrente Anza, fissata in $1187 \text{ m}^3/\text{s}$ alla sezione della diga.

A tal fine nel modello fisico è stata prevista la riproduzione in scala ridotta, fissata in 1:40, di un tratto del torrente Anza a monte ed a valle della diga, dello scarico di superficie esistente con muro di valle rialzato a quota 785.00 m s.m.m. e della nuova opera di scarico superficiale in progetto in corpo diga.

L'attività su modello ha previsto la verifica della capacità di deflusso dei due scarichi superficiali per il massimo livello di invaso previsto (784.50 m s.m.m.) e per la massima portata prevista ($1020 \text{ m}^3/\text{s}$, con l'ipotesi che lo scarico di mezzofondo porti $167 \text{ m}^3/\text{s}$) nonché la determinazione della scala delle portate per il solo nuovo scarico in corpo diga. Lo scarico superficiale nella configurazione con muro rialzato era stato oggetto di precedenti studi i cui risultati sono stati consegnati al Committente.

Per le varie prove, oltre alla determinazione dei livelli nell'invaso e del valore di portata scaricata, sono state eseguite svariate misure di livello idrico e pressione per determinare le condizioni di deflusso nelle due opere di scarico: pelo libero nel canale esistente, lungo il muro di destra del nuovo scarico e in 2 punti lungo l'asse di quest'ultimo; pressioni in quattro punti del nuovo ciglio di sfioro e in quattro punti del muro di destra del nuovo scarico.

Le prove eseguite su modello hanno permesso di evidenziare che la configurazione di progetto è in grado di smaltire la portata millenaria ($1020 \text{ m}^3/\text{s}$ di pertinenza dei due scarichi superficiali) con una quota di invaso pari a 784.33 m s.m.m. , minore della quota di massimo invaso prevista. Infatti, con l'invaso di monte a quota 784.50 m s.m.m. viene smaltita una portata media di $1054.33 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nel canale esistente il flusso è interamente contenuto dal muro di valle (in sinistra) mentre il ciglio del muro che delimita in destra il tratto terminale dello sfioratore esistente viene parzialmente tracimato dalla portata in arrivo.

Lungo lo scivolo di scarico in corpo diga si evidenziano pulsazioni del livello dell'acqua sul muro di destra localmente più alti della quota di sommità prevista nei disegni di progetto trasmessici. Tale superamento avviene per le portate scaricate con le quote di invaso 784.50 e 784.00 m s.m.m.

L'andamento delle pressioni sul ciglio di sfioro del nuovo scarico in corpo diga mostra leggere depressioni per le portate scaricate con le quote di invaso 784.50 e 784.00 m s.m.m.