UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI GENOVA
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

Skiarea Miara Srl

"Determinazione sperimentale della scala di deflusso per la stazione di misura della portata derivata dalla centrale idroelettrica di Rezzoaglio"

RELAZIONE FINALE
n. 0065794/2017
Genova 03/10/2017

Il Responsabile Scientifico
(Prof. Ilaria Gnecco)

INDICE

1 LA STAZIONE DI MISURA ESISTENTE 6

2 DESCRIZIONE DELLE PROVE DI LABORATORIO 7
2.1 Impianto di prova 7
2.2 Le similitudini tra modello di laboratorio e caso reale 9
2.1 Geometria ottimale della sezione di controllo 10
2.2 Programma di sperimentazione 12

3 ELABORAZIONE DEI RISULTATI 19
3.1 Derivazione sperimentale della scala di deflusso 19
3.1 Valutazione dell'accuratezza della scala di deflusso 20

4 CONCLUSIONI 26

ELENCO FIGURE

Figura 1: Vista della centrale e schema del tracciato in pianta del canale di scarico. 6
Figura 2: Vista del canale a pelo relativo all'impianto idraulico installato presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" dell'Università di Genova. 8
Figura 3: Layout in scala geometrica della prima geometria dello stramazzo di tipo trapezio con quote riportate in mm da testarsi in laboratorio..... 10
Figura 4: Layout in scala geometrica della geometria ottimale dello stramazzo di tipo trapezio con quote riportate in mm. 11
Figura 5: Vista della geometria ottimale dello stramazzo dotato di tubazione di areazione come installato in laboratorio..... 12
Figura 6: Vista dell'impianto di prova in corrispondenza della sezione di controllo e del misuratore di portata. 13
Figura 7: Scala di deflusso relativa alla stazione idroelettrica di Rezzoaglio con indicazione dei punti sperimentali riscalati al caso reale. 24
Figura 8: Scala di deflusso relativa alla stazione idroelettrica di Rezzoaglio con indicazione delle fasce di stima delle portate in funzione di letture puntuali del livello (oscillazioni del pelo libero). 25

ELENCO TABELLE

Tabella 1: Registro della prima sessione di prove condotta il 13 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 8 cm 15
Tabella 2: Registro della seconda sessione di prove condotta il 15 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm 16
Tabella 3: Registro della terza sessione di prove condotta il 16 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm..... 17
Tabella 4: Registro della quarta sessione di prove condotta il 19 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm 18
Tabella 5: Parametri e statistiche della scala di deflusso..... 20
Tabella 6: Valori di profondità (Y_M) e portata defluente (Q_M) osservate in laboratorio, corrispondenti valori di profondità, tirante idrico e portate (Y, h, Q) valutati nel caso reale. Viene inoltre riportato il valore della portata defluente derivato dalla scala di deflusso ed il corrispondente errore relativo percentuale. 22
Tabella 7: Valori di profondità, tirante idrico (Y, h, Q) in corrispondenza della sezione di misura della portata presso la centrale idroelettrica di Rezzoaglio e corrispondente valore della portata defluente derivato dalla scala di deflusso..... 23

Il presente documento costituisce la relazione finale dell'attività svolta dall'Università di Genova, nell'ambito del Contratto di Ricerca con Skiarea Miara Srl relativo alla "Determinazione sperimentale della scala di deflusso per la stazione di misura della portata derivata dalla centrale idroelettrica di Rezzoaglio"

Nella presente relazione è illustrata la stazione di misura come installata presso l'impianto idroelettrico di Rezzoaglio nonché l'esigenza di un suo adeguamento per una stima affidabile della portata per il previsto range di lavoro dell'impianto esteso a 1500 l/s.

L'attività sperimentale svolta presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" viene descritta nel dettaglio nella presente relazione ed in particolare si riportano i criteri teorico/sperimentali con i quali è stata definita la geometria ottimale della sezione di controllo e derivata sperimentalmente la corrispondente scala di deflusso.

La scala di deflusso è stata ottenuta sulla base dei dati sperimentali osservati utilizzando la tecnica della regressione lineare che utilizza il metodo dei minimi quadrati per la stima dei parametri. Quale misura della bontà della regressione e della relativa scala di deflussi sono stati calcolati diversi indici di errore ed è riportata una valutazione dell'accuratezza nel caso di letture puntuali di livello.

In allegato è riportato in scala il disegno costruttivo della geometria ottimale dello stramazzo di sezione trapezia.

1 LA STAZIONE DI MISURA ESISTENTE

La centrale idroelettrica di Rezzoaglio, sita in Via Rezzoaglio Inferiore, è attualmente dotata di una stazione di misura della portata, costituita da una sezione di controllo installata sul canale di scarico. Il canale di scarico ha uno sviluppo in pianta sostanzialmente rettilineo (cfr. Figura 1): presenta una lunghezza complessiva di circa 75 m di cui il tratto rettilineo prima dello sbocco sul torrente risulta pari a circa 60 m.

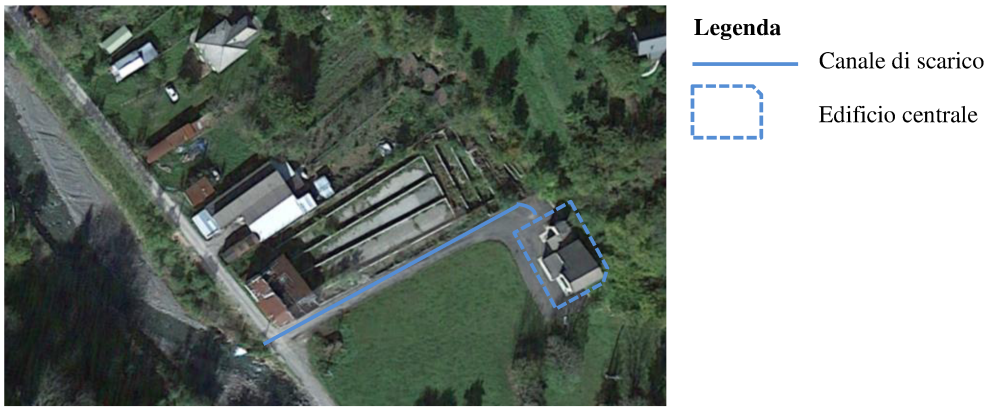


Figura 1: Vista della centrale e schema del tracciato in pianta del canale di scarico.

In data 07 Aprile 2017 è stato condotto un sopralluogo per la verifica del rilievo geometrico del canale di scarico della centrale nonché della sezione di controllo attualmente installata. Nel seguito si riportano i risultati del rilievo.

Il canale di scarico si sviluppa sotto la strada di accesso alla centrale, consiste in uno scatolare realizzato in cemento, attualmente in buone condizioni sul fondo e perfettamente liscio sulle pareti. Il canale presenta una sezione rettangolare di larghezza pari a 1.51 m ed altezza pari a 1.43 m. La pendenza è stata rilevata per gli ultimi 8 metri prima dello sbocco del canale pari al 2.1% ma si desume costante per tutto il tratto rettilineo anche in relazione alla costanza delle pendenza della strada di accesso alla centrale sotto la quale risulta realizzato il canale.

La sezione di controllo è costituita da uno stramazzo rettangolare in parete sottile, realizzato in materiale metallico. Il petto dello stramazzo misura 46 cm. La sezione di controllo è localizzata nel canale di scarico della centrale circa 3 metri a monte dello sbocco libero in torrente. La sezione di controllo è attrezzata con un sensore per la misura del livello di tipo piezoresistivo posizionato un metro a monte dello stramazzo rettangolare e fissato alla parete verticale del canale in sponda destra. Il sensore di livello piezoresistivo installato è SITRANS P, MPS series - 7MF1570 prodotto da Siemens. L'accuratezza di misura di tale strumento dedotta dalla scheda tecnica del produttore è pari a 0.2% del valore limite del campo di misura, ovvero pari a circa 3 mm.

L'obiettivo della presente attività di ricerca consiste nel dimensionare la stazione di misura della portata al fine di assicurarne una misura affidabile nell'intervallo 100-1500 l/s.

2 DESCRIZIONE DELLE PROVE DI LABORATORIO

Nella presente sezione è illustrata l'attività sperimentale condotta presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" dell'Università di Genova, altamente Qualificato ai sensi del D.L. 297/99 - nell'Albo dei Laboratori di Ricerca autorizzati dal MIUR (DM 593/00 art. 14 Lab). In particolare sono presentate le caratteristiche tecniche dell'impianto idraulico utilizzato per simulare le condizioni di funzionamento della stazione di misura della portata presso la centrale idroelettrica di Rezzoaglio. Successivamente sono indicati i criteri e le modalità del programma sperimentale di prova nonché la procedura adottata per la definizione della sezione di controllo ottimale per la stazione di misura di Rezzoaglio.

2.1 Impianto di prova

Presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" dell'Università di Genova, è installato un impianto idraulico costituito da un canale aperto a pendenza variabile alimentato da un sistema costituito da serbatoio-pompa a ricircolo (cfr. Figura 2). La misura della portata di riferimento è effettuata mediante sistema a diaframma collegato ad un manometro differenziale a mercurio, installato secondo la normativa UNI EN ISO 5167–1. L'errore dell'impianto di taratura utilizzato per la misura della portata è quantificabile in +/- 1%.

Si riporta nel seguito una descrizione di dettaglio dell'impianto idraulico. Il serbatoio di alimentazione nelle condizioni di massimo riempimento presenta una quota del pelo libero superiore rispetto la condotta di aspirazione di circa 1 m. L'impianto di alimentazione è costituito da una pompa centrifuga monoblocco Calpeda (Tipo NMS4 150/315D, 400/690 V, 34.5/19.9 A); la condotta di mandata che alimenta il canale è costituita da una tubazione in ghisa di una lunghezza complessiva di circa 10.5 m coprendo un dislivello di circa 3 m. In particolare il primo tratto della condotta di mandata ha un diametro di 230 mm e lunghezza pari a circa 4.5 m coprendo un dislivello rispetto alla quota dell'impianto di sollevamento pari a 1.5 m; a valle di tale tratto l'impianto idraulico presenta 3 condotte in parallelo di diametro rispettivamente pari a 50, 70 e 230 mm ciascuna dotata di uno specifico diaframma quale sezione di controllo per la misura della portata e di una valvola a saracinesca per la regolazione della stessa. Si noti che i diaframmi sono posizionati ad una distanza opportuna da valvole e/o raccordi secondo quanto indicato dalla normativa. L'impianto poi prosegue con un secondo tratto costituito da un'unica condotta di diametro pari a 230 mm e lunghezza complessiva di circa 3.5 m la quale coprendo un dislivello di circa 1.5 m si raccorda con la sezione di imbocco del canale attraverso un tratto "ad hoc" a sezione

gradualmente variata da sezione circolare a sezione rettangolare. Il canale realizzato in plexiglass ha una lunghezza complessiva di 12 m ed una sezione di larghezza pari a 400 mm ed altezza di 350 mm; il canale può essere posto in differenti condizioni di pendenza variabili tra la condizione orizzontale ed una pendenza massima di poco inferiore al 3%.



Figura 2: Vista del canale a pelo relativo all'impianto idraulico installato presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" dell'Università di Genova.

Nell'ambito della specifica applicazione è stato installato all'interno del canale un sensore di livello piezoresistivo, che presenta pertanto la stessa tecnica di misura installata presso la stazione di misura della centrale di Rezzoaglio. In particolare si tratta di un sensore Teledyne Isco 720 che presenta un intervallo di misura del livello compreso tra 0.03 e 3.05 m ed un'accuratezza della misura pari a ±0.008 m/m fino ad un livello di 1.52 m e pari a ±0.012 m/m per livelli superiori. In

analogia al caso reale, il sensore di livello è stato inserito in un pozzetto di calma realizzato in plexiglass di sezione semicircolare e diametro pari a 2 cm per consentire uno smorzamento delle oscillazioni in corrispondenza del sensore di misura.

2.2 Le similitudini tra modello di laboratorio e caso reale

In generale il comportamento di strutture che influiscono localmente sul moto di una corrente può essere studiato attraverso un modello in scala. Nello specifico la similitudine di Froude può essere utilizzata per lo studio dell'interazione idraulica tra una corrente fluida ed una sezione di controllo, tale fenomeno idrodinamico rientra infatti nei casi in cui l'influenza delle forze d'attrito è trascurabile rispetto a quella delle forze gravitazionali.

Dalla condizione $Fr = Fr_M$ dove $Fr = \frac{U}{\sqrt{gY}}$ e $Fr_M = \frac{U_M}{\sqrt{gY_M}}$ si ottengono in definitiva le seguenti relazioni tra le differenti scale, dove le grandezza contrassegnate con il pedice M sono riferite al modello in scala:

$$\text{lunghezze } \frac{L_M}{L} = k_L \tag{1}$$

$$\text{portate } \frac{Q_M}{Q} = k_L^{5/2} \tag{2}$$

$$\text{velocità } \frac{U_M}{U} = k_L^{3/2} \tag{3}$$

Il coefficiente k_L che definisce la similitudine geometrica tra modello e caso reale è detto coefficiente di scala e consente di definire le dimensione del modello in un rapporto costante con le corrispondenti dimensioni del caso reale.

Attraverso l'utilizzo della similitudine idraulica di Froude è quindi possibile esprimere la scala di deflusso ottenuta per la sezione di controllo realizzata in laboratorio e successivamente riscalarla per la sezione di controllo installata in campo.

Il coefficiente di scala è stato determinato in funzione della larghezza del canale di laboratorio e risulta essere pari a:

$$k_L = \frac{L_M}{L} = \frac{0.4}{1.51} = 0.265 \tag{4}$$

Definito il coefficiente di scala è possibile determinare l'intervallo di portate da indagare nel programma di sperimentazione in laboratorio in conformità all'intervallo di lavoro della centrale (100-1500 l/s). In particolare l'intervallo di portate da realizzare in laboratorio comprende valori di portata variabili tra circa 3 ed 55 l/s.

2.1 Geometria ottimale della sezione di controllo

La selezione della geometria della sezione di controllo è stata basata sui risultati di un'analisi numerica semplificata delle condizioni di deflusso della corrente attraverso uno stramazzo in parete sottile in condizioni di pendenza del fondo pari al 2.1%. L'analisi numerica è stata condotta in quanto la trattazione teorica riguarda unicamente sezioni di controllo installate in tratti orizzontali.

Visto anche l'ampio intervallo di portate oggetto di indagine si è optato per uno stramazzo di forma trapezia in modo tale da garantire la maggiore accuratezza possibile per l'intero intervallo di misura.

La prima geometria dello stramazzo in parete sottile testata in laboratorio viene riportata in Figura 3.

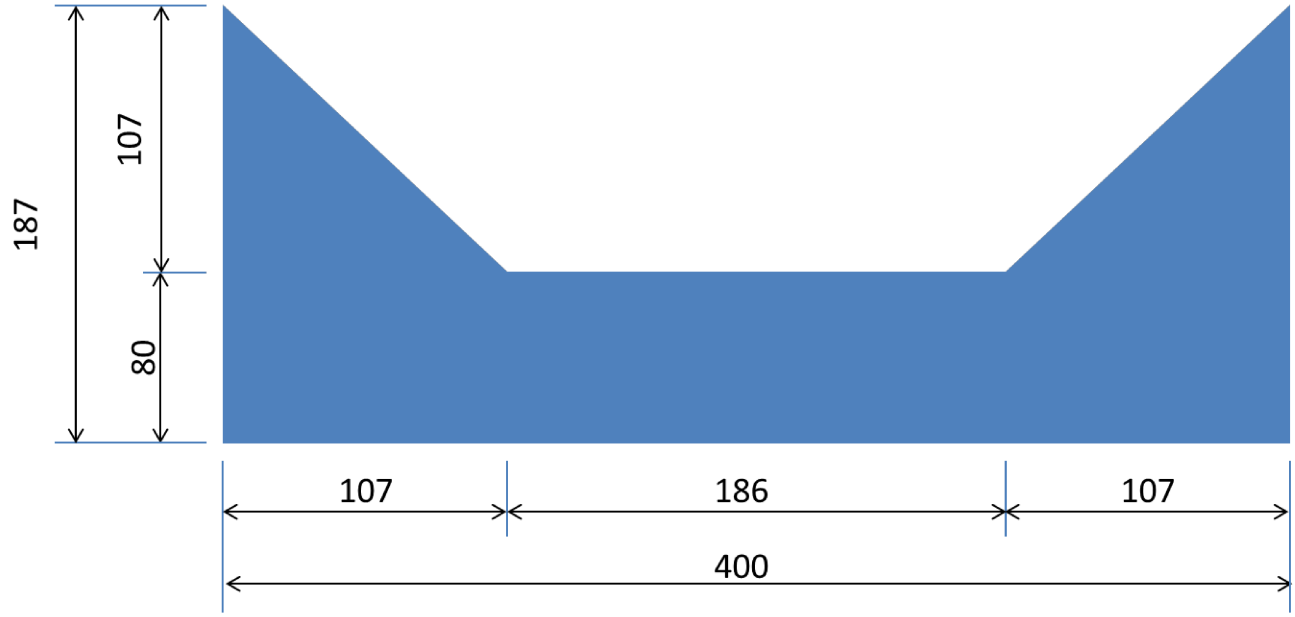


Figura 3: Layout in scala geometrica della prima geometria dello stramazzo di tipo trapezio con quote riportate in mm da testarsi in laboratorio.

L'altezza del petto dello stramazzo pari a 8 cm nel modello di laboratorio, ovvero pari a 30 cm nel caso reale è stata definita sulla base dei risultati dell'analisi numerica, ovvero al fine di garantire un franco di sicurezza di circa 30 cm nelle condizioni di portata massima pari a 1500 l/s.

L'analisi numerica ha anche consentito di verificare preliminarmente la localizzazione del risalto idraulico al variare delle diverse portate e quantificare preliminarmente il disturbo indotto alla sezione di misura.

La geometria ottimale della sezione di controllo è stata definita sperimentalmente in laboratorio andando ad aumentare l'altezza del petto dello stramazzo nel rispetto dell'ipotesi progettuale di garantire un franco di 30 cm per la portata massima. La geometria ottimale dello stramazzo è riportata in Figura 4.

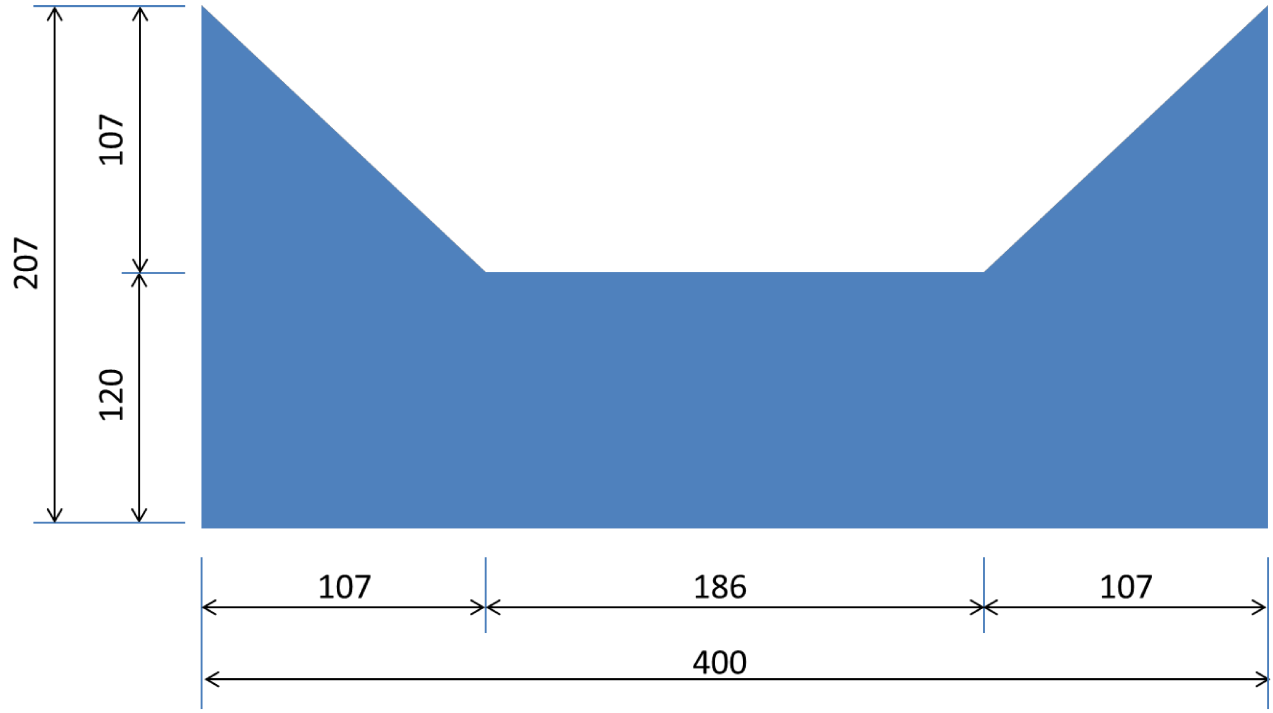


Figura 4: Layout in scala geometrica della geometria ottimale dello stramazzo di tipo trapezio con quote riportate in mm.

Nella configurazione ottimale il petto dello stramazzo ha un'altezza pari a 12 cm nel modello di laboratorio, corrispondente a 45 cm nel caso reale.

Nell'allegato A si riporta disegno tecnico quotato della configurazione ottimale dello stramazzo.

Nonostante il programma di sperimentazione di laboratorio abbia evidenziato un buon funzionamento della sezione di controllo con una corretta areazione della vena fluida per l'intervallo di portate il cui corrispondente livello a valle della sezione di controllo non interferisce con il petto dello stramazzo, si suggerisce l'installazione di una tubazione di areazione da installarsi in prossimità della soglia dello stramazzo, a valle dello stesso. La Figura 5 mostra una vista della geometria ottimale dello stramazzo dotato di tubazione di areazione come installato in laboratorio.



Figura 5: Vista della geometria ottimale dello stramazzo dotato di tubazione di areazione come installato in laboratorio.

2.2 Programma di sperimentazione

La configurazione dell'impianto di prova rispetta i rapporti di similitudine geometrica per quanto concerne sia la localizzazione dello stramazzo in parete sottile rispetto alla sezione di sbocco libero sia la localizzazione della sezione di misura del livello rispetto alla sezione di controllo. In Figura 6 è illustrata una vista del canale di prova, dove sono indicate le posizioni relative della sezione di controllo e del misuratore di livello (rispettivamente pari a 85 e 26 cm nel modello di laboratorio).

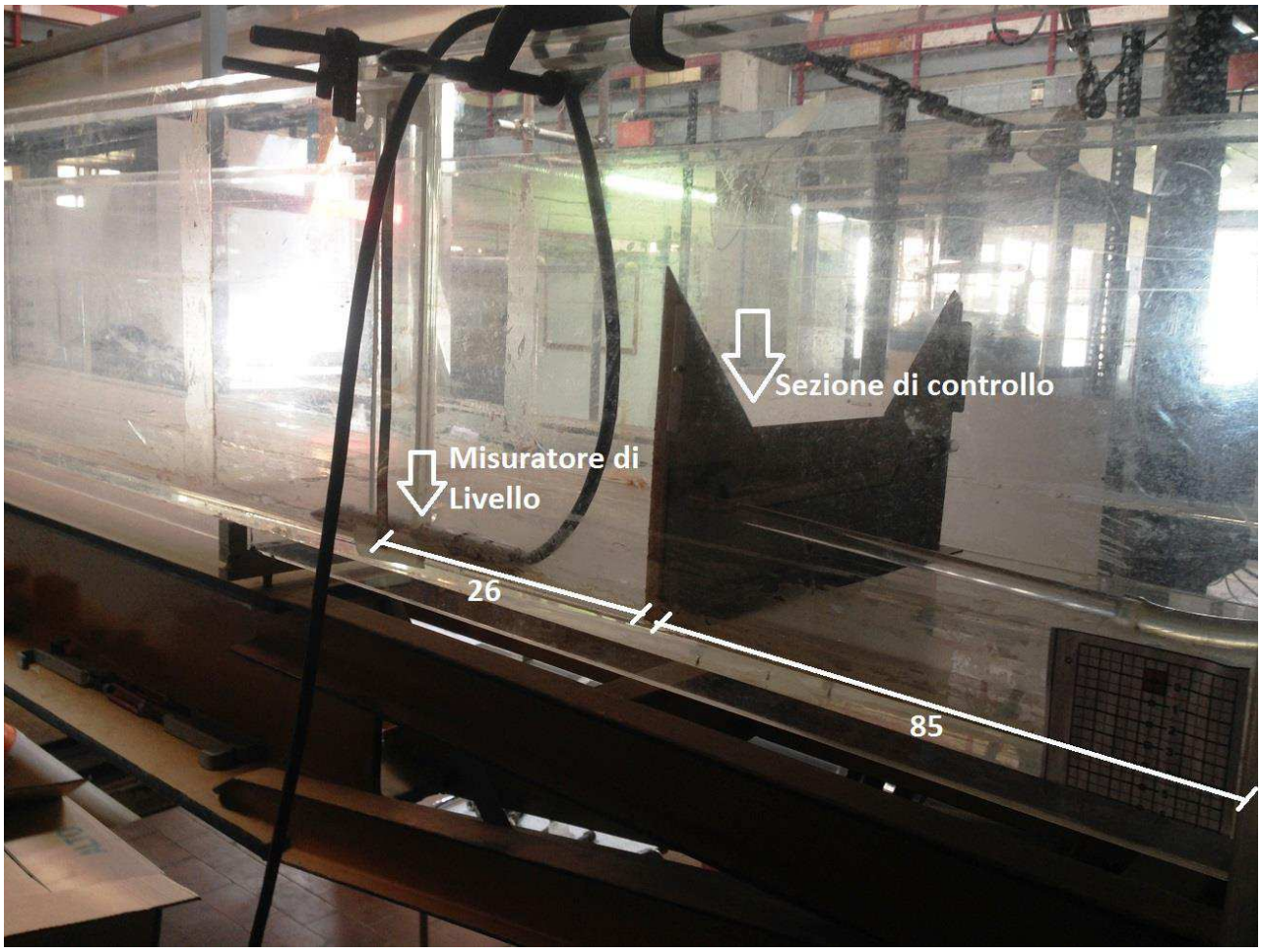


Figura 6: Vista dell'impianto di prova in corrispondenza della sezione di controllo e del misuratore di portata.

Il programma di sperimentazione ha riguardato 4 sessioni di prova; una prima sessione di prove sulla prima configurazione della sezione di controllo (altezza del petto dello stramazzo pari a 8 cm) e tre sessioni di prova sulla configurazione ottimale della sezione di controllo (altezza del petto dello stramazzo pari a 12 cm) .

Ciascuna sessione di prove ha previsto la generazione di almeno 10 differenti portate comprese nell'intervallo 3 - 55 l/s. Ciascuna portata è stata mantenuta costante nel canale per un intervallo temporale non inferiore a 5 minuti. Nel corso della durata della prova a portata costante si è rilevato manualmente il livello presso il pozzetto di calma, e sono state effettuate una o più letture istantanee dei livelli misurati dal sensore piezo-resistivo; infine è stata misurata la posizione del risalto e sono state verificate le condizioni di deflusso localmente in prossimità dello stramazzo sia in termini di oscillazioni nei pressi del pozzetto di calma, sia in termini di condizioni di areazione della vena fluida.

In Tabella 1 è riportato il registro della prima sessione di prova condotta il 13 giugno per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 8 cm. Per questa prima sessione di prove, si è osservato che per le portate più basse testate nella sessione di prova, ovvero per portate pari a circa

6 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 160 l/s), il risalto idraulico di tipo diretto si localizza, 4 metri a monte dallo stramazzo avvicinandosi fino a 2.5 m per valori di portata pari a circa 50 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 1400 l/s). La localizzazione del risalto relativamente vicino alla sezione dove si effettua la misura di livello induce oscillazioni sul pelo libero che diventano importanti, ovvero dell'ordine del centimetro già per portate pari a circa 20 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 550 l/s). La vena fluida risulta areata a singhiozzo già per portate pari a circa 11 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 290 l/s), il petto dello stramazzo risulta rigurgitato per portate pari a 25 l/s e lo stramazzo è completamente rigurgitato per portate pari a circa 35 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 990 l/s).

Tabella 1: Registro della prima sessione di prove condotta il 13 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 8 cm

# Prova	Portata [l/s]	Tirante Lett. Manuale [mm]	Tirante Lett. Sensore [mm]	Posizione risalto [m]	Condizioni di deflusso
1	5.67	135	137	4	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato quasi perfettamente
2	5.82	136	138	4.03	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato quasi perfettamente
3	10.03	155	158	3.9	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato quasi perfettamente
4	10.55	160	161	3.9	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato a singhiozzo
5	14.16	172	174	3.81	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato a singhiozzo
6	19.72	190	189	3.43	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo aereato a singhiozzo
7	24.67	201	203	3.3	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: petto rigurgitato con h_{valle} 10 cm;
8	25.16	202	204	3.24	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: petto rigurgitato con h_{valle} 10 cm;
9	35.88	228	230	2.9	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: completamente rigurgitato, qualche bolla a valle;
10	41.05	238	241	2.75	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: completamente rigurgitato, qualche bolla a valle;
11	41.17	242	239	2.73	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: completamente rigurgitato, qualche bolla a valle
12	41.64	239	241	2.75	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato: completamente rigurgitato, qualche bolla a valle
13	50.36	258	260	2.55	Forti oscillazioni nel pozzetto di calma, stramazzo NON aereato:completamente rigurgitato, neanche una bolla a valle

In Tabella 2, Tabella 3 e Tabella 4 sono riportati rispettivamente i registri della seconda, terza e quarta sessione di prove condotte il 15, 16 e 19 giugno per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm. Per queste sessioni di prove, si osserva, l'allontanamento del risalto idraulico rispetto alla prima sessione di prova condotta per lo stramazzo con altezza del petto pari a 8 cm. Il risalto si conferma di tipo diretto e per le portate più basse testate nelle sessioni di prova ovvero per portate pari a circa 6 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 160 l/s), si localizza 6 metri a monte dallo stramazzo e si avvicina fino a 4.5 m per le portate massime pari a circa 55 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 1540 l/s). La localizzazione del risalto induce oscillazioni sul

pelo libero che diventano significative, ovvero dell'ordine del centimetro, per portate pari a circa 40 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 1100 l/s). Le oscillazioni risultano pertanto notevolmente inferiori rispetto alla prima sessione di prove per tutte le portate inferiori a 40 l/s confermando la bontà della scelta progettuale ed in particolare l'aumento dell'altezza del petto dello stramazzo a 12 cm. La vena fluida, in queste sessioni di prove risulta completamente areata fino a portate pari a circa 32 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 890 l/s), mentre il petto risulta completamente rigurgitato per portate pari a 35 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 990 l/s) e lo stramazzo diviene completamente rigurgitato solo per portate pari a circa 45 l/s (che corrispondono nel caso reale a circa 1260 l/s). Le condizioni di deflusso locali in termini di areazione della vena fluida risultano significativamente migliorate rispetto alla prima sessione di prove, osservando una vena completamente areata per una portata di 35 l/s (rispetto ai 25 l/s della sessione precedente) confermando ancora una volta la bontà della scelta progettuale dell'altezza del petto dello stramazzo pari a 12 cm.

Tabella 2: Registro della seconda sessione di prove condotta il 15 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm

# Prova	Portata [l/s]	Tirante Lett. Manuale [mm]	Tirante Lett. Sensore [mm]	Posizione risalto [m]	Condizioni di deflusso
1	5.67	177	177	5.95	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
2	10.53	198	201	5.9	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
3	15.11	215	218	5.77	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
4	19.99	232	233	5.55	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
5	30.05	258	260	5.3	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di 5 mm), vena completamente areata
6	40.16	275	278	4.8	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), petto completamente rigurgitato
7	40.4	278	280	4.8	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), petto completamente rigurgitato
8	51.28	300	306	4.65	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
9	55.64	308	313	4.6	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato

Tabella 3: Registro della terza sessione di prove condotta il 16 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm

# Prova	Portata [l/s]	Tirante Lett. Manuale [mm]	Tirante Lett. Sensore [mm]	Posizione risalto [m]	Condizioni di deflusso
1	4.24	165	168	5.9	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
2	7.05	180	184	5.9	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
3	11.8	204	206	5.8	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
4	16.91	221	224	5.68	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
5	22.1	236	239	5.5	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
6	27	249	252	5.35	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di 5mm), vena completamente areata
7	32.04	261	263	5.15	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), livello di valle lambisce estremità del petto
8	32.25	260	262	5.2	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), livello di valle lambisce estremità del petto
9	37.81	272	274	5	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), petto completamente rigurgitato, ali parzialmente areate
10	38.83	274	276	4.95	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), petto completamente rigurgitato, ali parzialmente areate
11	41.17	282	285	4.75	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
12	48.47	294	296	4.65	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
13	51.28	297	300	4.65	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
14	54.8	305	308	4.6	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato

Tabella 4: Registro della quarta sessione di prove condotta il 19 giugno 2017 per la geometria dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm

# Prova	Portata [l/s]	Tirante Lett. Manuale [mm]	Tirante Lett. Sensore [mm]	Posizione risalto [m]	Condizioni di deflusso
1	4.45	167	169	5.9	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
2	8.92	190	193	5.9	Livello stabile nel pozzetto di calma, vena completamente areata
3	14.7	214	217	5.85	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata
4	20.07	231	234	5.7	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata (tubo di areazione parzialmente immerso)
5	24.92	245	248	5.5	Lievi oscillazioni nel pozzetto di calma (di qualche mm), vena completamente areata (tubo di areazione completamente immerso)
6	30.13	256	259	5.3	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di mezzo cm), livello di valle lambisce estremità del petto
7	30.75	255	259	5.3	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm, maggiori di quelle osservate questa mattina), livello di valle lambisce estremità del petto
8	35.03	267	271	5	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), petto dello stramazzo rigurgitato
9	41.17	278	281	4.9	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), stramazzo rigurgitato, solo quota delle ali areata a singhiozzo
10	45.49	285	291	4.8	Oscillazioni nel pozzetto di calma (di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
11	48.46	293	296	4.7	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
12	52.18	300	305	4.6	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
13	52.18	302	305	4.6	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato
14	54.8	308	312	4.6	Oscillazioni nel pozzetto di calma (anche > di 1 cm), stramazzo completamente rigurgitato

3 ELABORAZIONE DEI RISULTATI

Nella presente sezione è illustrata l'elaborazione dei dati sperimentali raccolti al fine della determinazione della scala di deflusso e della sua accuratezza. In particolare viene analizzata la base dati sperimentale al fine di individuare il campione di dati sul quale calcolare la curva di regressione e pertanto il restante campione con il quale la regressione viene validata. Successivamente sono indicati i criteri con cui viene stimata l'accuratezza sperimentale della scala di deflusso al variare della portata.

3.1 Derivazione sperimentale della scala di deflusso

La scala di deflusso, o "scala delle portate", specificata per la sezione di controllo ottimale, esprime la relazione (crescente) tra la portata defluente Q [l/s] ed il tirante idrico *h* [mm] attraverso una legge di potenza:

$$Q = \mathrm{a} \cdot h^b \qquad (5)$$

Al fine della derivazione sperimentale della scala di deflusso è stata analizzata l'intera base dati relativa alla geometria ottimale dello stramazzo con altezza del petto pari a 12 cm. I dati osservati durante le tre sessioni di prova sono stati elaborati al fine di calcolare il livello medio osservato dal sensore piezoresistivo durante ciascuna prova a portata costante nonché la relativa deviazione standard. I dati sperimentali sono stati elaborati inoltre per valutare le grandezze corrispondenti nel sistema reale utilizzando le opportune relazioni della similitudine idraulica.

Le letture di livello sono state riportate in misure di tirante idrico, *h*, valutato rispetto allo zero idrometrico rappresentato dalla quota petto dello stramazzo; in particolare alle misure di livello osservate in laboratorio e riscalate geometricamente per ottenere misure di livello nel caso reale è stata sottratta la quota dello zero idrometrico secondo la seguente relazione:

$$h = Y - p - if \cdot \mathrm{d} \rightarrow h = Y - 450 - 0.021 \cdot 1000 \qquad (6)$$

dove *p* è l'altezza del petto dello stramazzo espresso in mm, *if* è la pendenza del fondo e *d* è la distanza tra il misuratore di livello e lo stramazzo.

La scala di deflusso è stata ottenuta utilizzando la tecnica della regressione lineare che utilizza il metodo dei minimi quadrati per la stima dei parametri. Quale misura della bontà della regressione è stato calcolato il coefficiente di determinazione R^2, l'errore standard della regressione e l'indicatore di errore PBIAS.

L'indicatore di errore PBIAS si calcola mediante la seguente espressione:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Q - Q_{regr})}{\sum_{i=1}^{n}(\mathrm{Q})} \cdot 100 \qquad (7)$$

Il valore ottimo del PBIAS è zero, tuttavia valori modesti indicano accuratezza della regressione, in particolare valori positivi indicano una tendenza della scala di deflusso alla sottostima del dato osservato mentre valori negativi indicano una tendenza alla sovrastima.

Si è inoltre valutato l'errore relativo percentuale di ciascuna prova.

In Tabella 5 sono riportati i parametri della scala di deflusso, per la stima della portata defluente Q espressa in l/s sulla base delle misure di tirante idrico espresso in mm; sono inoltre riportati gli indicatori di affidabilità utilizzati nella presente analisi dati: coefficiente di determinazione, errore standard e PBIAS. La scala di deflusso risulta molto ben determinata, ovvero molto accurata, come indica l'elevato valore del coefficiente di determinazione pari a 0.999 ed i limitati valori degli indicatori di errore: errore standard e PBIAS rispettivamente pari a 2.2% e -0.1%.

In Tabella 6 si riportano tutti i dati relativi alle tre sessioni di prova, in particolare sono indicati i valori di profondità (Y_M) e portata defluente (Q_M) osservate in laboratorio, nonché i corrispondenti valori di profondità, tirante idrico e portate (Y, h, Q) valutati nel caso reale. Inoltre viene riportato il valore della portata defluente derivato dalla scala di deflusso ed il corrispondente errore relativo percentuale. Si noti che gli errori relativi corrispondenti alla serie di prove sperimentali utilizzate come validazione e riportate nella parte finale della tabella (al di sotto della tripla linea di separazione) sono compresi nell'intervallo ±4% confermando l'affidabilità della scala di deflusso.

Tabella 5: Parametri e statistiche della scala di deflusso.

a	***b***	**R^2**	**SE**	**PBIAS**
$2.88 \cdot 10^{-3}$	1.996	0.999	2.2 %	-0.1 %

In Figura 7 è illustrata la scala di deflusso determinata per via sperimentale e l'intera base dati, in azzurro sono indicati i punti utilizzati nella regressione lineare per la stima dei parametri mentre in blu sono indicati i punti utilizzati per validare la curva di regressione. Inoltre in Tabella 7 è riportata la scala di deflusso sperimentale per la centrale idroelettrica di Rezzoaglio in forma tabellare: in particolare sono riportati i valori della portata defluente valutati a partire da un valore del tirante idrico di 100 mm e successivamente con passo di 25 mm.

3.1 Valutazione dell'accuratezza della scala di deflusso

Le prove sperimentali condotte in laboratorio hanno evidenziato come la presenza del risalto idraulico influenzi le condizioni di stabilità del pelo libero della corrente in prossimità della sezione di misura. In particolare, a causa dell'elevata pendenza del canale di misura, il carattere della corrente risulta supercritico per tutti i valori di portata con conseguente realizzazione di un risalto idraulico di tipo diretto che connette idraulicamente la corrente supercritica in arrivo con la corrente subcritica imposta dalla sezione di controllo di valle. All'aumentare del valore di portata e pertanto

dell'energia della corrente in arrivo, il risalto idraulico si sposta gradualmente verso valle (come evidenziato nei registri di prova). La relativa prossimità del risalto idraulico con la sezione di misura, seppur non condizionando il funzionamento idraulico della sezione di controllo determina oscillazioni del pelo libero della corrente che aumentano in funzione della portata. In particolare tali oscillazioni hanno un'ampiezza variabile tra 1 e 8 mm nel modello di laboratorio che corrispondono ad oscillazioni variabili tra 4 e 30 mm nel caso reale. Si è ipotizzata una legge di potenza per valutare l'andamento delle oscillazioni in funzione del tirante idrico e di conseguenza della portata.

La Figura 8 riporta la scala di deflusso per la centrale di Rezzoaglio e l'intervallo di valori di portata stimati nell'ipotesi di valori di livello variabili; in particolare si è ipotizzata una condizione di sottostima del livello corrispondente al valor medio atteso decurtato di un valore pari a metà dell'intervallo di oscillazione stimato in quelle condizioni, analogamente si è ipotizzata una condizione di sovrastima del livello. Si osservi innanzitutto che tale intervallo di variazione delle portate corrisponde all'errore commesso effettuando una misura istantanea del livello affetta dalle specifiche condizioni di oscillazione e pertanto tale errore si riduce all'errore strumentale (assunto trascurabile) nell'ipotesi di effettuare una misura di livello mediata su un intervallo di almeno 5 minuti. Nonostante si sia assunto, in via cautelativa, un intervallo di variazione del livello significativo, l'errore sulla misura istantanea della portata risulta comunque compreso tra ±6%.

Tabella 6: Valori di profondità (Y_M) e portata defluente (Q_M) osservate in laboratorio, corrispondenti valori di profondità, tirante idrico e portate (Y, h, Q) valutati nel caso reale. Viene inoltre riportato il valore della portata defluente derivato dalla scala di deflusso ed il corrispondente errore relativo percentuale.

Modello		Caso reale			Scala di deflusso	
Y_M [mm]	Q_M [l/s]	Y [mm]	h [mm]	Q [l/s]	Q_{regr} [l/s]	e_r [%]
168.0	4.24	634.2	201.8	117.4	114.9	-2.1
184.0	7.05	694.6	262.2	195.2	193.8	-0.7
206.3	11.80	778.9	346.5	326.7	338.1	3.5
224.3	16.91	846.9	414.5	468.2	483.4	3.2
239.0	22.10	902.2	469.8	611.9	620.8	1.5
252.5	27.00	953.2	520.8	747.6	762.5	2.0
263.7	32.04	995.3	563.0	887.1	890.7	0.4
274.5	37.81	1036.2	603.8	1046.9	1024.5	-2.1
262.5	32.25	990.9	558.5	892.9	876.8	-1.8
276.0	38.83	1041.9	609.5	1075.1	1043.7	-2.9
285.5	41.17	1077.8	645.4	1139.9	1169.9	2.6
296.8	48.47	1120.5	688.2	1342.0	1329.8	-0.9
300.5	51.28	1134.4	702.0	1419.8	1383.7	-2.5
308.8	54.80	1165.8	733.5	1517.3	1510.2	-0.5
169.0	4.45	638.0	205.6	123.2	119.3	-3.2
193.0	8.92	728.6	296.2	247.0	247.2	0.1
216.7	14.70	817.9	385.5	407.0	418.4	2.8
233.7	20.07	882.1	449.7	555.7	568.9	2.4
247.8	24.92	935.6	503.2	690.0	711.9	3.2
259.3	30.13	979.0	546.6	834.2	839.7	0.7
258.5	30.75	975.8	543.4	851.4	830.1	-2.5
271.2	35.03	1023.7	591.3	969.9	982.3	1.3
280.5	41.17	1058.9	626.5	1139.9	1102.6	-3.3
291.2	45.49	1099.2	666.8	1259.5	1248.6	-0.9
295.5	48.46	1115.5	683.1	1341.8	1310.5	-2.3
304.5	52.18	1149.5	717.1	1444.8	1443.8	-0.1
311.7	54.80	1176.5	744.2	1517.3	1554.5	2.5
305.0	52.18	1151.4	719.0	1444.8	1451.4	0.5
177.0	5.67	668.2	235.8	157.0	156.8	-0.1
201.0	10.03	758.8	326.4	277.7	300.0	8.0
218.0	15.11	823.0	390.6	418.4	429.3	2.6
233.0	19.99	879.6	447.2	553.5	562.5	1.6
260.0	30.05	981.5	549.1	832.0	847.5	1.9
278.0	40.16	1049.5	617.1	1112.0	1069.7	-3.8
280.0	40.40	1057.0	624.6	1118.6	1096.0	-2.0
313.0	55.64	1181.6	749.2	1540.6	1575.6	2.3
306.0	51.28	1155.2	722.8	1419.8	1466.6	3.3

Tabella 7: Valori di profondità, tirante idrico (Y, h, Q) in corrispondenza della sezione di misura della portata presso la centrale idroelettrica di Rezzoaglio e corrispondente valore della portata defluente derivato dalla scala di deflusso.

Scala di deflusso		
Y	**h**	**Q_{regr}**
[mm]	**[mm]**	**[l/s]**
532	100	28.3
557	125	44.2
582	150	63.6
607	175	86.5
632	200	112.9
657	225	142.8
682	250	176.2
707	275	213.2
732	300	253.6
757	325	297.5
782	350	344.9
807	375	395.9
832	400	450.3
857	425	508.2
882	450	569.6
907	475	634.5
932	500	702.9
957	525	774.8
982	550	850.2
1007	575	929.1
1032	600	1011.5
1057	625	1097.3
1082	650	1186.7
1107	675	1279.5
1132	700	1375.9
1157	725	1475.7
1182	750	1579.0

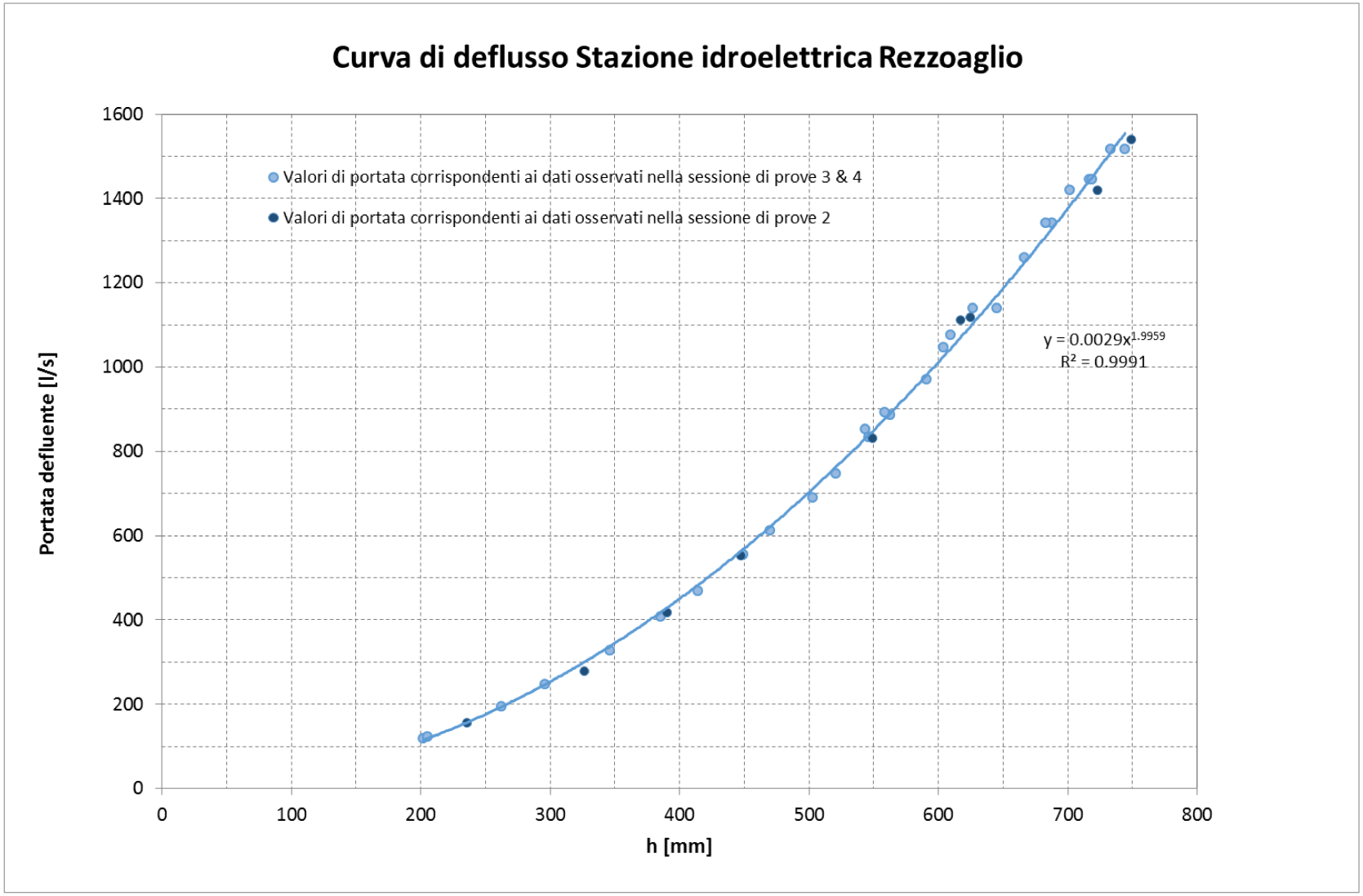


Figura 7: Scala di deflusso relativa alla stazione idroelettrica di Rezzoaglio con indicazione dei punti sperimentali riscalati al caso reale.

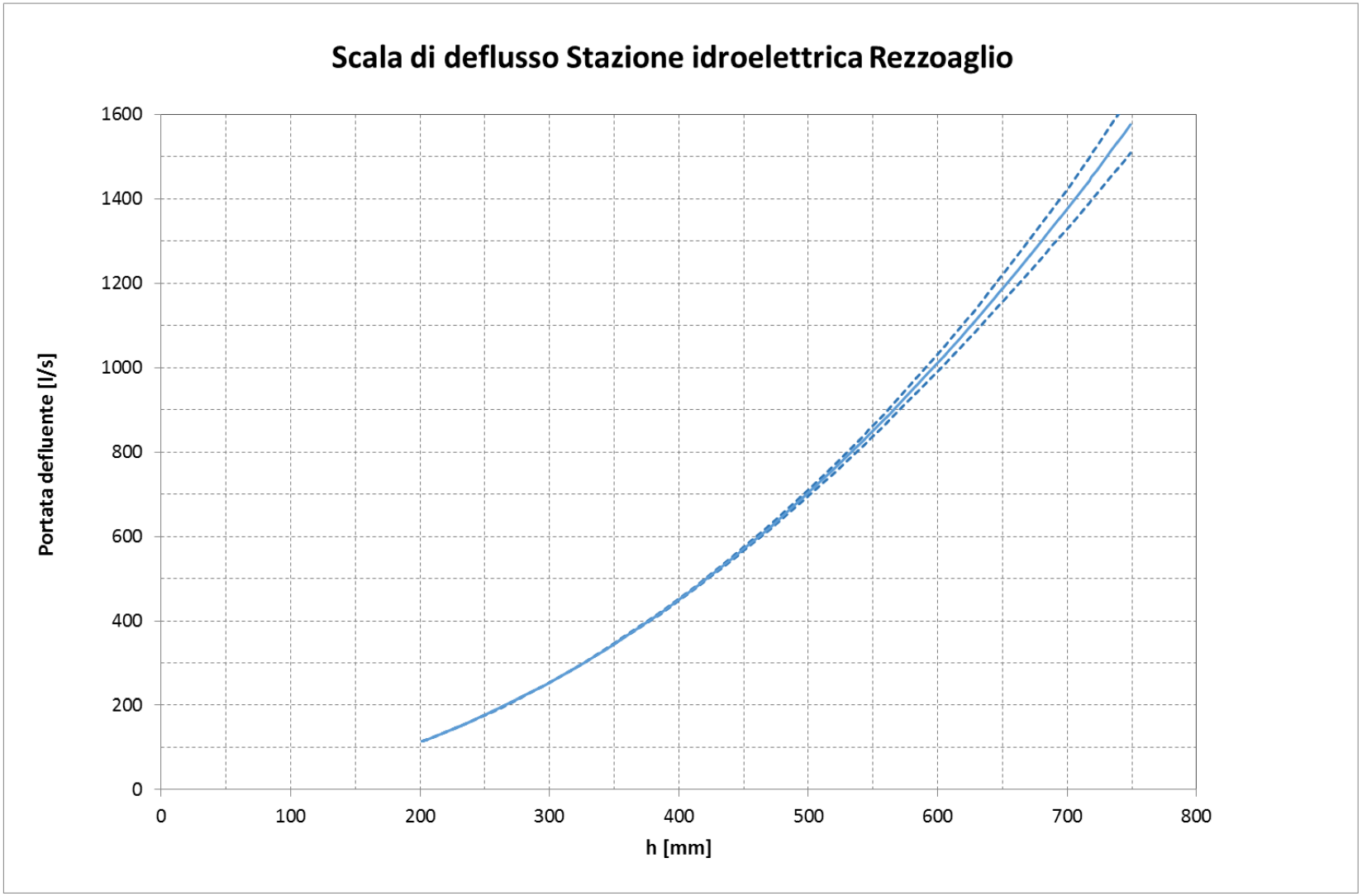


Figura 8: Scala di deflusso relativa alla stazione idroelettrica di Rezzoaglio con indicazione delle fasce di stima delle portate in funzione di letture puntuali del livello (oscillazioni del pelo libero).

4 CONCLUSIONI

L'attività sperimentale svolta presso il Laboratorio di Idraulica "E. Marchi" ha consentito di determinare una scala di deflusso per la stima delle portate defluenti nel canale di scarico della centrale idroelettrica di Rezzoaglio per l'intervallo di valori 100-1500 l/s in previsione dell'incremento della concessione di derivazione della portata richiesta dalla società Skiarea Miara Srl ed in fase di approvazione da parte di Regione Liguria. Tenuto conto dell'ampiezza dell'intervallo di misura e dell'importanza di poter assicurare una buona accuratezza della misura, è stata definita una sezione di controllo a sezione trapezia per consentire un adeguato tirante idrico anche per portate inferiori ai 100 l/s. Inoltre la definizione di una scala di deflusso sperimentale ha consentito di superare i problemi relativi ad una pendenza del canale di scarico non ottimale per questa tipologia di sezioni di controllo.

Inoltre, la realizzazione in laboratorio di una sezione di controllo in scala ha consentito di verificare l'influenza del risalto idraulico sulle oscillazioni del pelo libero in corrispondenza della sezione di misura e di determinare pertanto una dimensione del petto dello stramazzo ottimale. È stato inoltre verificato il corretto funzionamento della sezione di misura anche in termini di areazione della vena fluida per l'intervallo di portate compatibile con tale condizione di funzionamento.

Sulla base della sperimentazione condotta si riporta in allegato la geometria ottimale della sezione di controllo che dovrà essere installata in corrispondenza della sezione terminale del canale di scarico ad una distanza di un metro a valle della sezione in cui è installato il misuratore di livello.