



# REGIONE LOMBARDIA



## INFRASTRUTTURE LOMBARDE

Via Nicolo' Copernico, 38 - 20125 Milano

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO  
Ing. Vittorio Peruzzi

# NUOVE OPERE DI REGOLAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL LAGO D'IDRO PROGETTO DEFINITIVO

Dott. Ing. ~~TOMMASO TASSI~~  
n. 2671  
Ordine degli Ingegneri  
della Provincia di Venezia



*Philip Mignosa*

PROGETTAZIONE A.T.I.

CAPOGRUPPO

**F&M**  
favero&milan ingegneria

Ing. Tommaso Tassi  
Ing. Federico Moro  
Ing. Valentina Cioci  
Ing. Antonio Nuzzo

Via Belvedere 8/10, 30035 Mirano (VE)  
Tel. 041-5785711, Fax 041-4355933  
web: www.favero-milan.com

**SCA**

Prof. Geol. Andrea Cancelli  
Ing. Paolo Cancelli  
Ing. Glanluca Bragonzi

Studio Cancelli Associato  
Via Sansovino 23, 20133 Milano  
Tel. 02-45488725, Fax 02-45488726  
E-mail: sca@sca.fastwebnet.it

**INGEGNERIA 2P**  
& associati

Ing. Corrado Petris  
Ing. Giovanni Carretta

Via G.B. Dall'Armi 27/3,  
30027 San Donà di Piave  
Tel. 0421-307700, Fax 0421-307716  
web: www.ingegneria2p.it

Ingegnere  
**Giuseppe Baldo**  
Ingegneria e Ambiente

Ing. Giuseppe Baldo  
Dott. Elisa Porcelluzzi  
Ing. Francesca Domeneghetti

Via delle industrie 18/A,  
30038 Spinea  
Tel. 041-8221863, Fax 041-8221864  
web: www.ingbaldo.com

MODELLAZIONE FISICA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA  
Prof. Ing. Paolo Mignosa

TITOLO ELABORATO:

## IDRAULICA OPERE GENERALI RELAZIONE DESCRITTIVA MODELLAZIONE FISICA

SCALA:

N. DOCUMENTO:

FASE	REDATTORE	DISCIPLINA	ARGOMENTO	TIPOLOGIA	N. ELABORATO	REVISIONE
D	MI	ID	OPGR	R	005	1

REV.	DATA	OGGETTO REVISIONE	REDAZIONE	VERIFICA	CONTROLLO
0	31-03-10	PRIMA EMISSIONE	MI	DP	FM
1	14-05-10	VALIDAZIONE	MI	DP	FM



## Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INSTALLAZIONE SPERIMENTALE .....</b>	<b>2</b>
2.1	MODELLO FISICO .....	2
2.2	STRUMENTAZIONE.....	4
<b>3</b>	<b>PROVE SU MODELLO ED ELABORAZIONI.....</b>	<b>7</b>
3.1	CARATTERISTICHE DELLE PROVE SU MODELLO.....	7
3.2	ANALISI ED OSSERVAZIONI PRELIMINARI.....	7
3.3	ELABORAZIONE DEI DATI.....	10
3.4	ANALISI DINAMICA DELLE SOLLECITAZIONI .....	12
<b>4</b>	<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....</b>	<b>13</b>
<b>APPENDICE A : SIMILITUDINE DI FROUDE.....</b>		<b>14</b>
<b>APPENDICE B : PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DEL MODELLO FISICO .....</b>		<b>16</b>
B.1	POSIZIONAMENTO E SCELTA DELLA SCALA GEOMETRICA.....	17
B.2	CONSIDERAZIONI SULLA SCABREZZA DELLA GALLERIA POLICENTRICA.....	17
B.2	COSTRUZIONE DEL MODELLO .....	18
<b>APPENDICE C : STRUMENTAZIONE.....</b>		<b>23</b>
c.1	MISURA DEI LIVELLI IDRICI .....	24
c.2	MISURA DELLE PORTATE.....	25
c.3	MISURA DELLE PRESSIONI.....	26
c.4	MISURA DELLE FORZE .....	27
c.5	CALIBRAZIONE DEI TRASDUTTORI DI FORZA E DI PRESSIONE .....	28
<b>APPENDICE D : DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA.....</b>		<b>29</b>
<b>APPENDICE E : CALIBRAZIONE DEGLI STRUMENTI .....</b>		<b>34</b>

## 1 INTRODUZIONE

Favero e Milan Ingegneria Spa, in qualità di capogruppo del raggruppamento temporaneo di prestatori di servizi costituito con Studio Cancelli Associato, Ingegneria 2P & Associati Srl, Ing. Baldo Giuseppe, ha incaricato il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (d'ora in poi denominato DICATeA) dell'Università degli studi di Parma di realizzare un modello fisico della vasca di dissipazione posta al termine della nuova galleria di by-pass del lago d'Idro.

Il modello fisico ha lo scopo di consentire di riprodurre, in scala adeguata, i fenomeni che si realizzano nella vasca di dissipazione stessa ed, in ultima analisi, di fornire indicazioni sulla correttezza dimensionale dell'opera o sulle eventuali modifiche da apportare per ottimizzarne l'effetto di dissipazione.

Il modello è stato realizzato, a partire dai disegni di progetto, presso il Laboratorio di Idraulica del DICATeA nei mesi di dicembre 2009- gennaio 2010. Le prove sul modello sono state effettuate tra il termine del mese di gennaio e la prima metà del mese di febbraio 2010.

La presente relazione è articolata nei seguenti capitoli:

– nel Capitolo 2 vengono descritte le principali caratteristiche del modello fisico e della strumentazione messa in opera al fine di acquisire le grandezze fisiche di interesse (livelli, portate, pressioni e forze);

– nel Capitolo 3 si riportano le principali caratteristiche delle prove effettuate, le elaborazioni dei dati e l'analisi dei risultati;

– nel Capitolo 4 si riportano sinteticamente le conclusioni più significative della sperimentazione effettuata;

– nelle Appendici A-D, a cui si rimanda per maggiori approfondimenti, sono riportati: il criterio di similitudine adottato nel modello (Appendice A); la progettazione e le fasi di costruzione del modello fisico (Appendice B); i dettagli della strumentazione adottata (Appendice C); la documentazione fotografica delle prove effettuate (Appendice D).

## 2 INSTALLAZIONE SPERIMENTALE

### 2.1 MODELLO FISICO

Il modello fisico (Figura 1) è stato realizzato presso il laboratorio di idraulica del DICATeA dell'Università degli Studi di Parma.

Esso è composto da:

1) un tratto di imbocco a forte pendenza che progressivamente si restringe fino a raggiungere le dimensioni della successiva galleria con sezione a ferro di cavallo. All'imbocco dello scivolo è ubicata una paratoia piana con funzioni di regolazione<sup>1</sup>;

---

<sup>1</sup> Tale tratto non riproduce alcuna struttura presente nel prototipo ma ha la funzione fondamentale di portare la corrente in breve spazio alle condizioni idrodinamiche prossime a quelle che si realizzano nel prototipo nel tratto terminale della galleria, ove si instaurano condizioni di moto pressoché uniforme.

2) un breve tratto terminale della galleria con sezione a ferro di cavallo (80 m nel prototipo), il tratto di raccordo con la galleria a base piana (20 m nel prototipo), il successivo tratto di galleria a base piana (20 m nel prototipo);

3) lo scivolo di raccordo tra la galleria e la vasca di dissipazione;

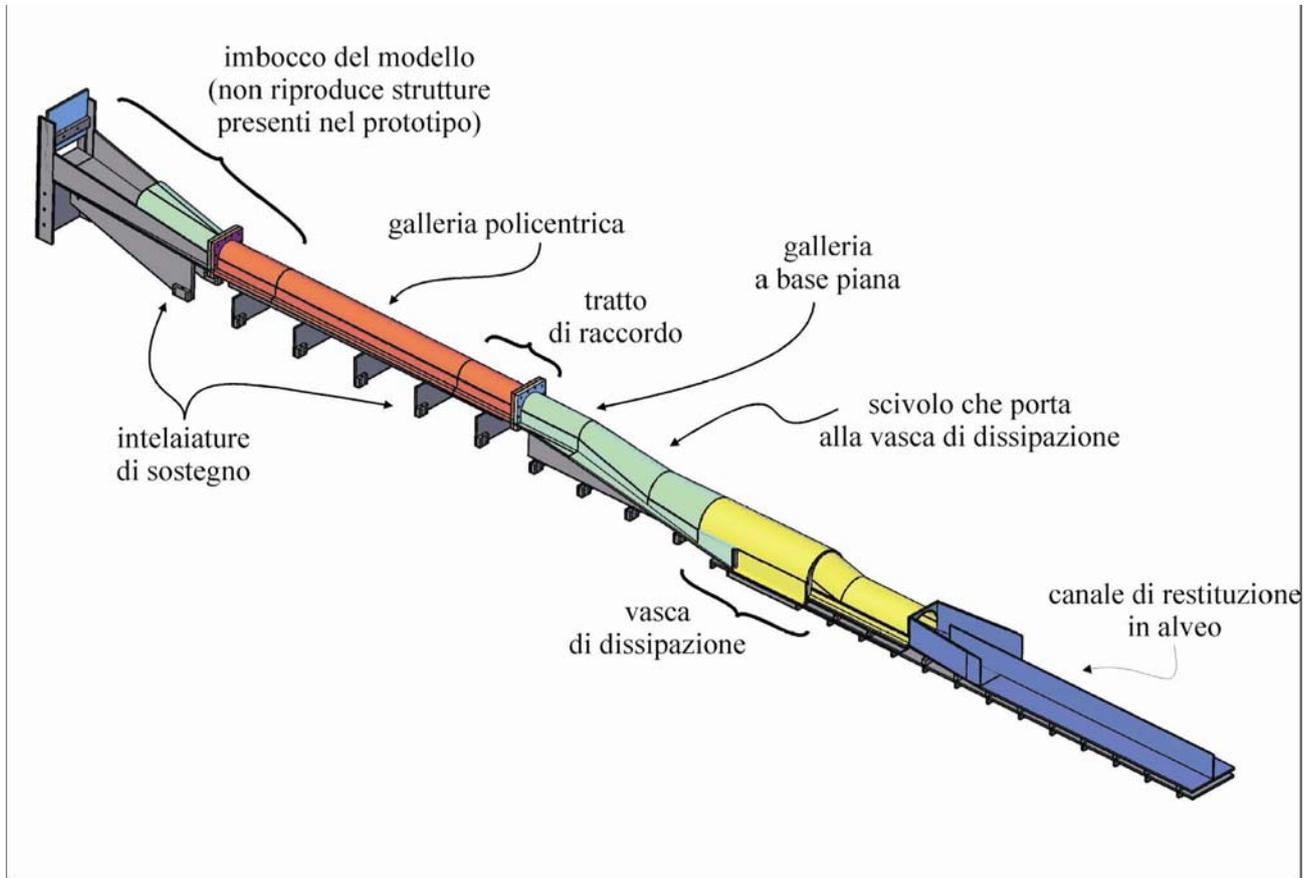


Figura 1. Render 3D del modello fisico.

4) la vasca di dissipazione vera e propria, (larghezza 12 m, lunghezza 23 m nel prototipo) comprensiva dei blocchi di dissipazione, del gradino terminale e della copertura;

5) il restringimento previsto a valle della vasca medesima;

6) il canale di restituzione.

La realizzazione è stata eseguita seguendo il criterio di similitudine di Froude (Appendice A). Sulla base dello spazio disponibile si è adottata la scala geometrica, indistorta, pari a 1:50.

Il modello è stato realizzato tramite la sagomatura e il successivo assemblaggio di elementi in PVC e/o PMMA. I pezzi più complessi, quali le pareti e il fondo della galleria policentrica, sono stati lavorati per fresatura a controllo numerico. Tutti gli elementi in plexiglas sono stati lucidati e resi trasparenti, consentendo la visione del fluido lungo l'intero sviluppo del modello.

Anche le intelaiature di supporto sono state realizzate in PVC e disposte in modo che la strumentazione necessaria trovasse spazio e fosse raggiungibile per le operazioni di manutenzione. Il circuito idraulico che alimenta il modello è quello stesso della canaletta entro la quale il modello è stato collocato. Una paratoia a ventola permette il controllo dei livelli a valle del canale di restituzione, mentre l'intera canaletta può essere inclinata a piacere per la regolazione della pendenza.

Per una descrizione più dettagliata dei materiali, delle fasi e delle tecniche che hanno caratterizzato la costruzione del modello si rimanda all'Appendice B.

## 2.2 STRUMENTAZIONE

Nelle Figure 2, 3 e 4 è indicata la collocazione della strumentazione nel modello. Sono state misurate le seguenti grandezze fisiche:

- 1) portata transitante nel modello a regime;
- 2) sollecitazione integrale agente su uno dei blocchi di dissipazione (Figura 2);
- 3) pressione in due punti all'interno della vasca di dissipazione, uno a monte (P2) e l'altro a valle (P1) dei blocchi (Figura 2);
- 4) pressione in un punto sullo scivolo al termine della galleria, immediatamente a valle del cambio di pendenza che conduce alla vasca di dissipazione (P3, Figura 3);
- 5) livello idrico nella vasca di dissipazione, poco a monte del gradino terminale (L3, Figura 2);
- 6) livello idrico sullo scivolo poco a monte dell'inizio dei chute blocks (L4, Figura 2);
- 7) velocità della corrente in due punti del canale di restituzione, uno in prossimità dello sbocco (V1) e l'altro al termine del divergente che dà inizio al canale stesso (V2) (Figura 4);
- 8) livello idrico nel canale di restituzione, in corrispondenza dei punti di misura della velocità (L1 e L2, Figura 4);
- 9) livello idrico nella galleria policentrica, ca.70 m a monte del cambio di pendenza con cui inizia lo scivolo che conduce alla vasca di dissipazione.

La portata è stata misurata nella condotta di alimentazione a valle della valvola che ne consente la regolazione, mediante un misuratore elettromagnetico con accuratezza pari allo 0.5 % della lettura.

La misura dei livelli idrici è stata effettuata mediante un trasduttore di posizione ad ultrasuoni, caratterizzato da un'accuratezza pari a  $\pm 0.5$  mm. Tale strumento è installato su un carrello che scorre su guide vincolate ai traversi superiori della canaletta.

La misura della pressione è stata effettuata mediante celle con accuratezza pari allo 0.01 % del fondo scala (350 mbar).

La misura della forza agente sul dente di dissipazione ha richiesto un apparato più complesso. La Figura 5 riporta una sezione della lastra in PVC che riproduce il fondo della vasca di dissipazione.

Sono messi in evidenza il dente strumentato, la camera stagna che contiene la cella di carico (in grado di lavorare a flessione), la cella stessa e i relativi elementi di supporto. L'accuratezza dell'intero sistema è pari all'1% della lettura.

Per i dettagli relativi alla strumentazione e alle calibrazioni si rimanda all'Appendice C.

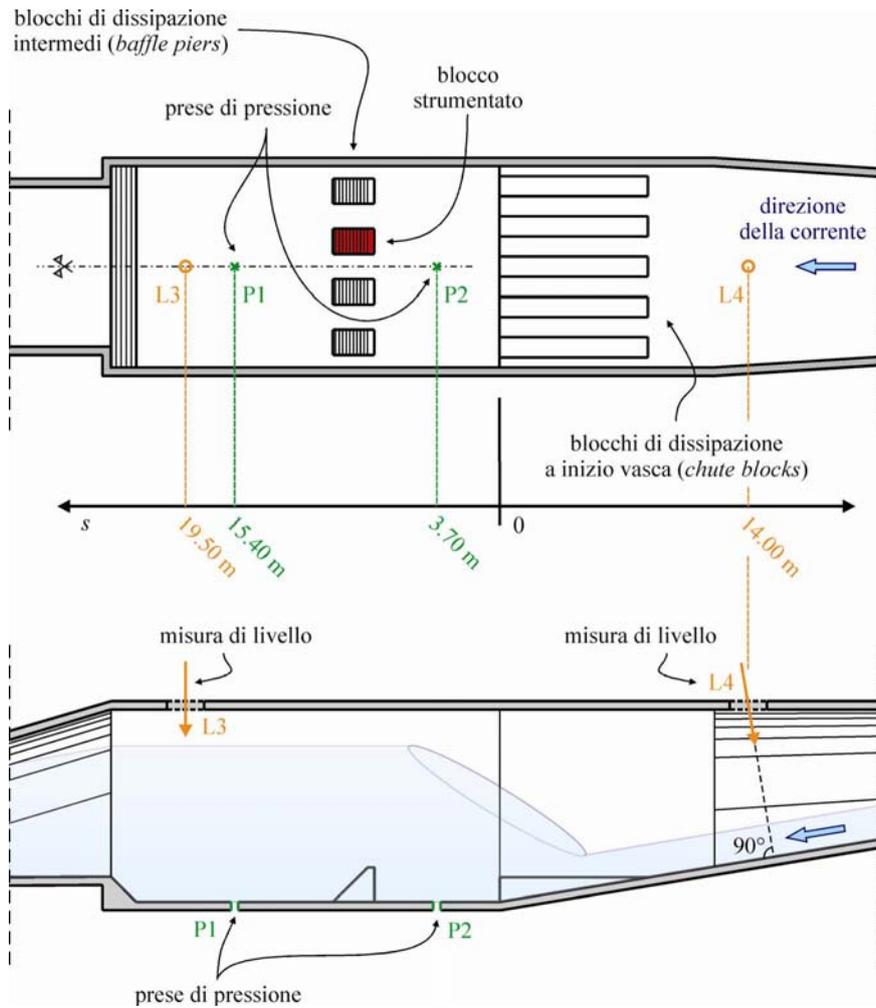


Figura 2. Disposizione degli strumenti in corrispondenza della vasca di dissipazione. Sono evidenziate le due prese di pressione, il dente di dissipazione strumentato e le posizioni in cui sono stati misurati i livelli.

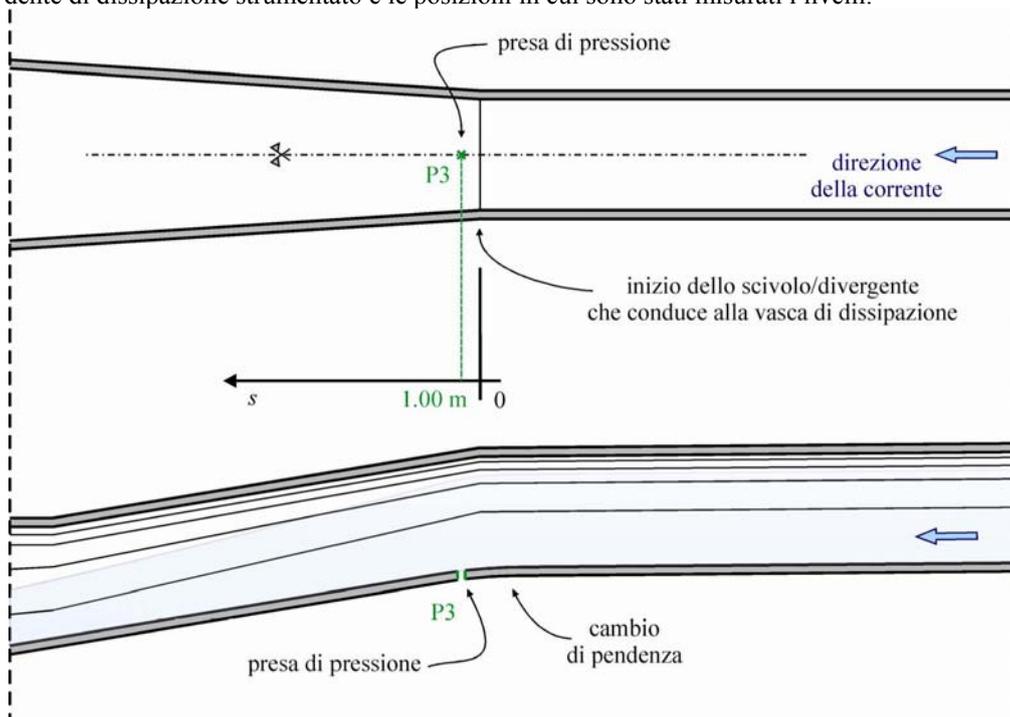


Figura 3. Localizzazione della presa di pressione in corrispondenza dell'inizio dello scivolo.

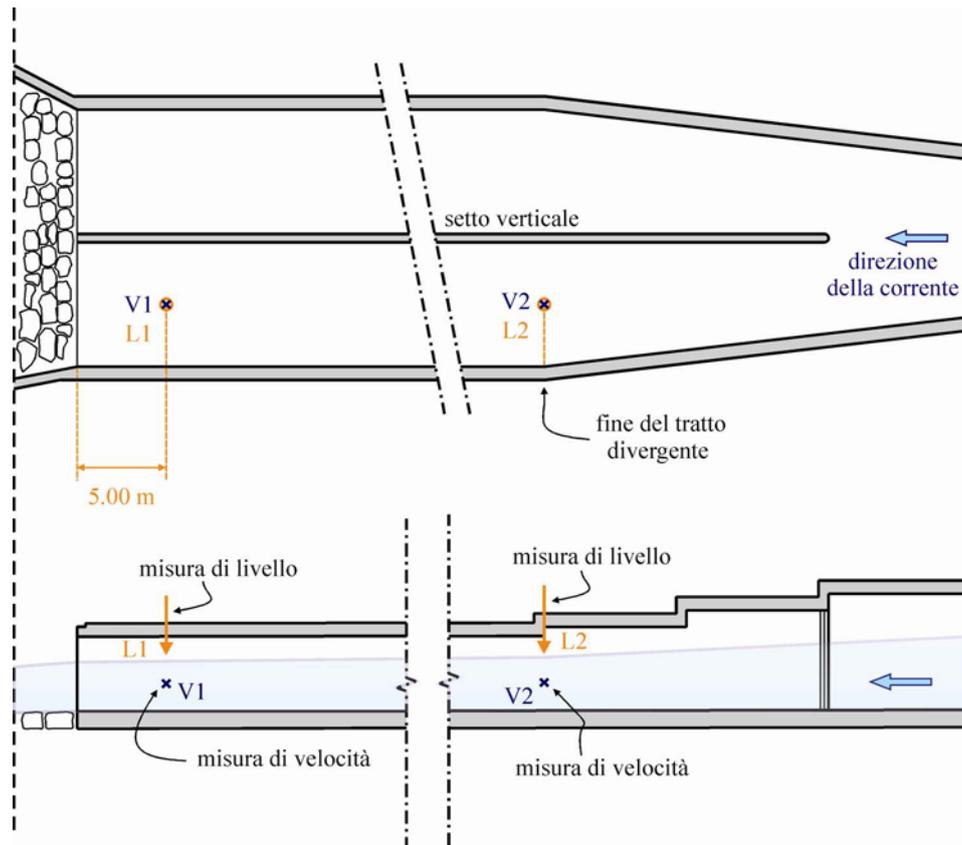


Figura 4. Localizzazione dei punti di misura delle velocità e dei livelli nel canale di restituzione.

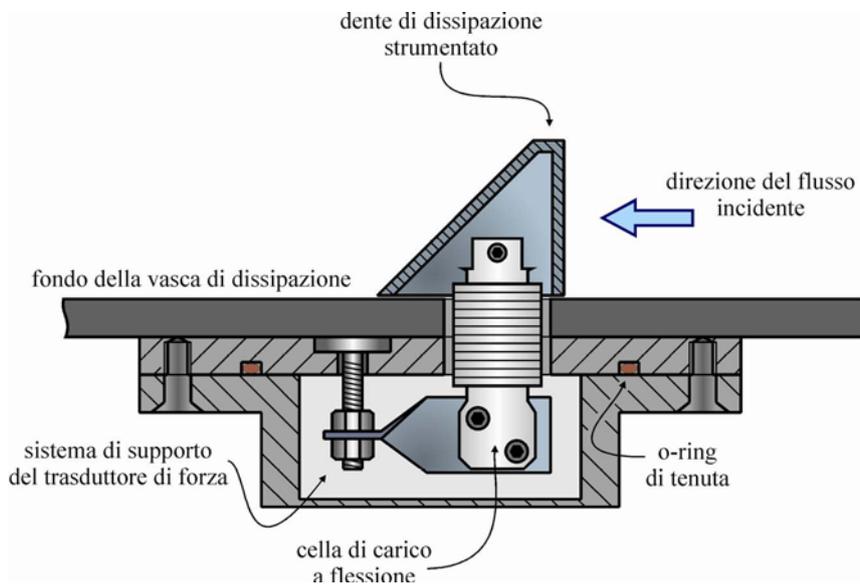


Figura 5. Schema del dispositivo per la misura della sollecitazione integrale sul blocco di dissipazione (per una descrizione dettagliata si rimanda all'Appendice B).

### 3 PROVE SU MODELLO ED ELABORAZIONI

#### 3.1 CARATTERISTICHE DELLE PROVE SU MODELLO

Secondo quanto stabilito in convenzione, sono state condotte tre prove in condizioni di moto permanente (Tabella 1). La prova No 3 corrisponde all'evento di progetto per la galleria e la vasca di dissipazione (portata  $Q = 332 \text{ m}^3/\text{s}$ , corrispondente ad un evento di tempo di ritorno millenario), mentre le prove 1 e 2 sono relative a portate più modeste.

No della prova	Portata nel prototipo	Portata nel modello (similitudine di Froude)
(#)	( $\text{m}^3/\text{s}$ )	( $\text{l/s}$ )
1	120	6.79
2	200	11.31
3	332	18.78

**Tabella 1 – Prospetto delle prove eseguite.**

La sollecitazione agente sui blocchi di dissipazione si presenta come una fluttuazione irregolare. Lo stesso dicasi per le pressioni sul fondo della vasca di dissipazione o sul fondo della galleria. Al fine di migliorare la stima dei valori massimi, la durata della prova No 3, caratterizzata dalla portata più elevata, è stata protratta per 60 minuti (corrispondenti a poco più di 7 ore nel prototipo). Per le prove con portata minore, meno significative ai fini progettuali, il tempo di acquisizione è stato ridotto a 10 minuti.

#### 3.2 ANALISI ED OSSERVAZIONI PRELIMINARI

Preliminarmente sono stati eseguiti alcuni test per verificare il funzionamento idraulico del modello e regolare le paratoie di monte e di valle; solo successivamente, nel corso di prove dedicate, sono stati misurati ed acquisiti i livelli idrici, le velocità e le pressioni nelle diverse posizioni del modello, nonché la sollecitazione integrale agente sul blocco di dissipazione strumentato.

Il primo test è stato condotto con una portata di  $18.78 \text{ l/s}$  che corrisponde, nella scala del prototipo, alla portata massima di progetto, pari a  $332 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La paratoia posta a monte del tratto di imbocco del modello, che consente di modificare le caratteristiche idrodinamiche (altezza, velocità) della corrente all'ingresso della galleria, è stata parzializzata in modo tale da riprodurre l'altezza di moto uniforme relativa alla portata transitante in un punto ubicato a metà del tratto di galleria modellato<sup>2</sup>. Si è poi condotta un'analisi di sensibilità modificando, entro valori ragionevoli, l'apertura della paratoia e verificando che le condizioni della corrente al piede dello scivolo (ovvero all'ingresso della vasca di dissipazione) non ne fossero apprezzabilmente influenzate. Le analisi svolte hanno mostrato che variazioni anche significative del tirante idrico in galleria (dell'ordine del centimetro nel modello, ovvero di circa mezzo metro nel prototipo) si traducono in variazioni del tirante idrico (e quindi del numero di Froude) ai piedi dello scivolo inferiori all'1% e, quindi, trascurabili rispetto alle altre incertezze.

---

<sup>2</sup> Tale punto nel prototipo è situato circa 70 m a monte dell'inizio dello scivolo che precede la vasca di dissipazione  
D-MI-ID-OPG-R-005-rev 1.doc: Relazione descrittiva modellazione fisica

Dall'analisi del moto della corrente nel modello possono farsi le seguenti osservazioni:

– In corrispondenza del cambio di pendenza tra galleria e scivolo non si osserva alcuna tendenza al distacco della vena. Le successive misure di pressione ivi effettuate hanno confermato l'assenza di depressioni ed, a maggior ragione, l'assenza di rischi di fenomeni di cavitazione nel prototipo.

– Il risalto inizia a formarsi sullo scivolo, a monte dell'inizio del chute blocks (Figura 6). Esso, accompagnato dal notevole assorbimento di aria che gli è proprio, rimane comunque confinato nella vasca di dissipazione. La maggior parte del fenomeno dissipativo è concentrato a monte dei baffle piers, come si evince anche dalle accentuate fluttuazioni misurate alla cella P2. A valle dei baffle piers la corrente è molto più stabile, anche se è ancora fortemente aerata e turbolenta.



Figura 6. Risalto idraulico nella vasca di dissipazione per una portata di 18.78 l/s, corrispondenti a 332 m<sup>3</sup>/s nel prototipo.

– Nel tratto immediatamente a valle della vasca di dissipazione, caratterizzato da una sezione di forma rettangolare con copertura semicircolare, la corrente presenta un profilo caratterizzato da forti ondulazioni del pelo libero, dovute all'istaurarsi di un regime di moto prossimo alla condizione critica (Figura 7).

– Ancora più a valle, entrando nel tronco di canale divergente, la corrente evolve definitivamente in condizioni supercritiche e il tirante idrico tende ad abbassarsi per il continuo allargamento della sezione trasversale. In questo tratto inizia il setto intermedio, che provoca una turbolenza localizzata, causata dall'urto della corrente contro l'elemento stesso (Figura 7).



Figura 7. Profilo della corrente nel tratto a valle della vasca di dissipazione per una portata di 18.78 l/s, corrispondenti a 332 m<sup>3</sup>/s nel prototipo.

– Nell'ultimo tratto di canale, a sezione rettangolare di larghezza costante, la corrente presenta un profilo di tipo veloce ritardato: il tirante idrico tende infatti, seppure debolmente, ad aumentare verso valle. Essendo veloce, la corrente non risente dell'effetto dei due bruschi gradini posti al termine della galleria di fuga, realizzati proprio allo scopo di garantire la sconnessione idraulica tra monte e valle. A questo proposito potrebbe sorgere il legittimo dubbio che il tratto di corrente veloce possa essere in realtà soppresso, in tutto od in parte, dal rigurgito generato in corrispondenza dello sbocco nell'alveo del fiume Chiese. Si è allora voluto verificare quale livello idrico di corrente lenta si dovrebbe realizzare, proprio in corrispondenza dello sbocco, per contrastare la spinta della corrente veloce proveniente dalla galleria. A questo scopo si è proceduto ad innalzare progressivamente la paratoia a ventola situata al termine della canaletta, finora completamente abbattuta, fino a generare un tirante idrico sufficiente a provocare la formazione di un risalto idraulico all'interno dello scatolare a due canne che costituisce l'ultimo tratto della galleria di fuga. Si è verificato che, affinché ciò avvenga, occorrerebbe innalzare il livello di valle ben oltre la quota del cielo della galleria di fuga stessa, provocando il funzionamento in pressione dello scatolare<sup>3</sup> e localizzando il risalto idraulico nel tratto divergente (a valle della vasca di dissipazione). Una modellazione matematica della confluenza, realizzata mediante un modello bidimensionale ai volumi finiti, ha definitivamente confermato che i tiranti idrici in corrispondenza della confluenza non sono tali da provocare un funzionamento siffatto e che pertanto la corrente nella galleria di fuga si mantiene (per la portata considerata) effettivamente veloce fino allo sbocco. Nelle successive prove si è pertanto mantenuta la paratoia a ventola sempre completamente abbattuta.

La valutazione qualitativa dei fenomeni idraulici osservati nel modello ha messo in luce che, per quanto la vasca dissipi gran parte dell'energia che la corrente possiede al piede dello scivolo, nel canale di restituzione si ristabilisce un profilo di corrente veloce. Tale situazione si discosta in modo significativo da quella inizialmente prevista in sede progettuale e comporta la necessità di sistemare opportunamente l'alveo del fiume Chiese nella zona di sbocco, per evitare fenomeni di erosione provocati dalla corrente veloce in uscita dalla galleria.

<sup>3</sup> Tale situazione nel modello non può essere esattamente simulata, in quanto non è stato predisposto il cielo dello scatolare a doppia canna, sapendo che tale funzionamento sarebbe stato inaccettabile

### 3.3 ELABORAZIONE DEI DATI

Per ciascuna prova e per ciascuna grandezza è stata effettuata la ricerca dei valori massimo e minimo registrati durante l'acquisizione. Sono state calcolate la media e la deviazione standard del campione e, infine, è stato determinato il percentile 1% del campione stesso (P0.001), ossia il valore superato solo dall'uno per mille dei dati acquisiti. I risultati, per le forze e per le pressioni, sono riassunti nella Tabella 2, già riportati alla scala del prototipo. I valori elevati di deviazione standard della pressione a monte dei blocchi (P2) e della forza integrale sul dente di dissipazione sono indicativi dell'elevata turbolenza che la corrente possiede in questa zona. Le deviazioni standard delle pressioni si riducono invece sensibilmente nella parte di valle della vasca (P1). I valori minimi delle pressioni si mantengono comunque positivi, anche se in P2 con la portata minima assumono valori piuttosto bassi. Allo stesso modo sono stati elaborati i livelli idrici nella vasca di dissipazione a valle dei baffle piers (L3); le relative stime dei valori medi e delle deviazione standard, sono riportate nella Tabella 3.

Le medie e le deviazioni standard delle velocità e dei livelli nel canale di restituzione sono riportati nella Tabella 4.

Si noti che le velocità nel canale di restituzione sono riferite ad un unico punto di misura, caratterizzato da un affondamento rispetto al pelo libero circa pari alla metà del tirante idrico locale. Pertanto i dati riportati in tabella non rappresentano la velocità media nelle rispettive sezioni ma offrono una stima dei valori che le velocità possono raggiungere all'interno del canale.

Sullo scivolo che porta alla vasca di dissipazione è stata misurato il tirante idrico nel punto indicato in Figura 2. Ivi la larghezza della sezione di misura è pari a 11.63 m; in Tabella 5 si riportano le grandezze acquisite e, note la portata transitante e la geometria della sezione, i valori di velocità media ricavati indirettamente.

GRANDEZZE NEL PROTOTIPO						
Prova	Portata	Sollecitazione sul dente di dissipazione	Pressione nella vasca (a valle dei blocchi) - P1	Pressione nella vasca (a monte dei blocchi) - P2	Pressione in galleria P3	
(No)	(m <sup>3</sup> /s)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
1	120 ± 1	157.5	60.5	64.0	9.1	<b>max</b>
		122.5	57.7	53.9	8.4	<b>P<sub>0.001</sub></b>
		70.0	54.0	33.0	6.6	<b>mean</b>
		16.3	1.0	5.7	0.6	<b>std</b>
		5.0	46.0	1.1	4.2	<b>min</b>
2	200 ± 1	280.0	77.0	99.9	12.4	<b>max</b>
		222.5	72.8	76.3	11.8	<b>P<sub>0.001</sub></b>
		132.5	67.5	47.6	10.1	<b>mean</b>
		27.5	1.5	7.6	0.5	<b>std</b>
		17.5	54.5	14.0	7.9	<b>min</b>
3	332 ± 2	427.5	97.5	127.7	18.4	<b>max</b>
		351.3	91.9	103.9	17.6	<b>P<sub>0.001</sub></b>
		220.0	84.0	72.3	15.8	<b>mean</b>

REGIONE LOMBARDIA  
**NUOVE OPERE DI REGOLAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA DEL LAGO D'IDRO**  
**PROGETTO DEFINITIVO**

		42.5	2.0	8.9	0.6	<b>std</b>
		7.5	65.5	26.4	13.6	<b>min</b>

Tabella 2 – Risultati delle elaborazioni dei dati acquisiti (grandezze riportate alla scala del prototipo).

<b>Prova</b>	<b>Portata</b>	<b>Livello (mean)</b>	<b>Livello (std)</b>
(No)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)
1	120	5.32	0.33
2	200	6.82	0.42
3	332	9.00	0.50

Tabella 3 – Livelli idrici nella vasca di dissipazione (L3) (grandezze riportate alla scala del prototipo).

<b>Prova</b>	<b>Portata</b>	<b>Velocità a valle (V1)</b>	<b>Livello a valle (L1)</b>	<b>Velocità a monte (V2)</b>	<b>Livello a monte (L2)</b>	
(No)	(m <sup>3</sup> /s)	(m/s)	(m)	(m/s)	(m)	
1	120	5.4	1.38	6.2	1.20	<b>mean</b>
		0.2	0.06	0.1	0.11	<b>std</b>
2	200	6.9	1.88	7.4	1.57	<b>mean</b>
		0.2	0.13	0.1	0.09	<b>std</b>
3	332	8.7	2.46	8.9	2.35	<b>mean</b>
		0.2	0.09	0.1	0.17	<b>std</b>

Tabella 4 – Velocità e livelli idrici nel canale di restituzione (grandezze riportate alla scala del prototipo).

<b>Prova</b>	<b>Portata</b>	<b>Tirante idrico in un punto dello scivolo (L4)</b>	<b>Velocità in un punto dello scivolo (mis. ind.)</b>	
(No)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m/s)	
1	120	0.68	15.2	<b>mean</b>
		0.11	0.8	<b>std</b>
2	200	1.12	15.3	<b>mean</b>

		0.17	1.2	std
3	332	1.64	17.4	mean
		0.09	1.2	std

Tabella 5 –Livelli idrici e velocità (ricavate indirettamente) in un punto dello scivolo che conduce dalla galleria alla vasca di dissipazione (grandezze riportate alla scala del prototipo).

### 3.4 ANALISI DINAMICA DELLE SOLLECITAZIONI

Le sollecitazioni caratterizzate da una natura spiccatamente fluttuante sono la forza integrale agente sui baffle piers e la pressione sul fondo della vasca a monte dei blocchi stessi. Tali grandezze sono state analizzate nel dominio delle frequenze, per determinarne la densità spettrale di potenza. In questo modo è possibile individuare la frequenza dominante con la quale le sollecitazioni agiscano sulla struttura. Nelle Figura 8 sono riportati i risultati (nella scala del modello) riguardanti la sollecitazione sui blocchi; si osserva che la componente pulsante più importante ha una frequenza pari a 2.93 Hz (che nel prototipo corrispondono a 0.41 Hz). Inoltre, le componenti con frequenza superiore a 25.39 Hz (3.59 Hz nel prototipo) sono caratterizzate da intensità trascurabili (inferiori almeno di un ordine di grandezza) rispetto alle precedenti.

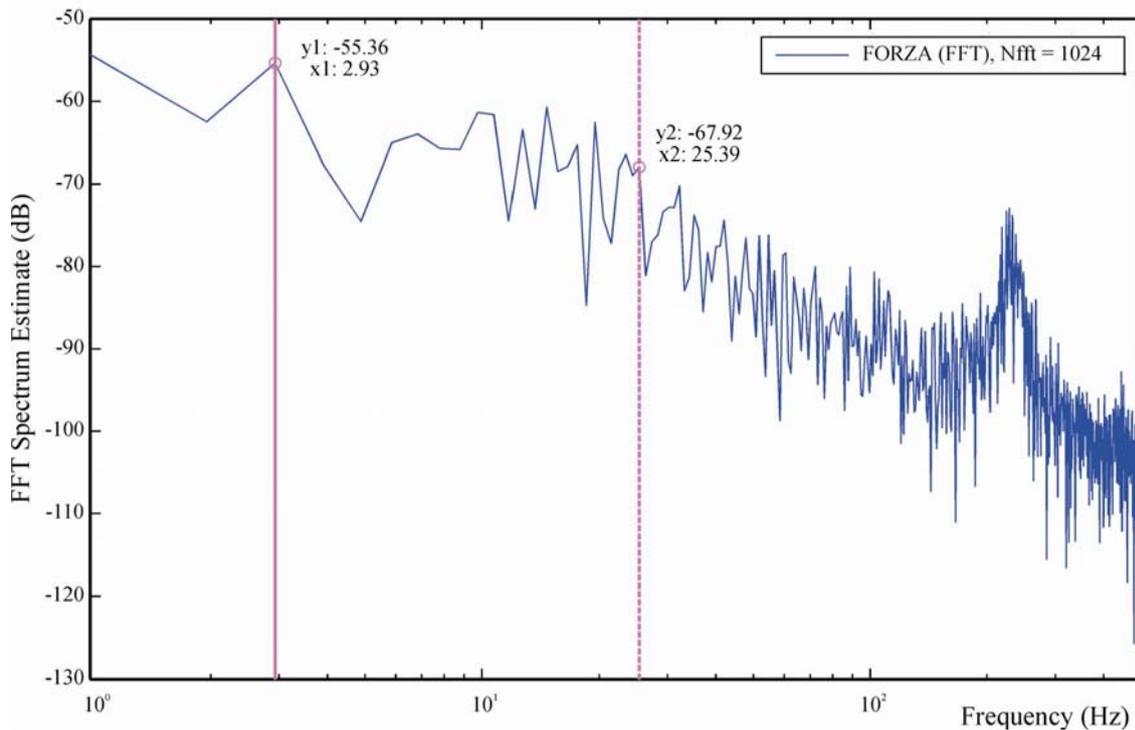


Figura 8. Spettro di potenza della sollecitazione dinamica agente sul dente di dissipazione strumentato. (grandezze nella scala del modello).

Per quanto riguarda le pressioni agenti al fondo della vasca a monte dei blocchi (Figura 9) si osserva che le sollecitazioni di maggiore importanza hanno frequenze comprese tra 4.88 e 31.25 Hz nella scala del modello (0.69 e 4.42 Hz nel prototipo). In questo caso il picco principale è seguito da altri due picchi di notevole importanza caratterizzati da frequenze superiori (ca. 14 e 25 Hz nel modello, corrispondenti a 2.0 e 3.5 Hz nel prototipo). La differenza principale tra lo spettro della cella di carico e quello della cella di pressione consiste nel fatto che il primo presenta un solo picco di notevole rilievo. Ciò è spiegabile se si considera che il blocco è soggetto ad una somma di azioni

dinamiche distribuite sul suo intero sviluppo superficiale, mentre la cella di pressione restituisce una misura che si può considerare “puntuale”. Il fatto di considerare l’integrale delle sollecitazioni sul dente ha l’effetto di filtrare le componenti a maggior frequenza che si sviluppano a scale di turbolenza inferiori e quindi localmente.

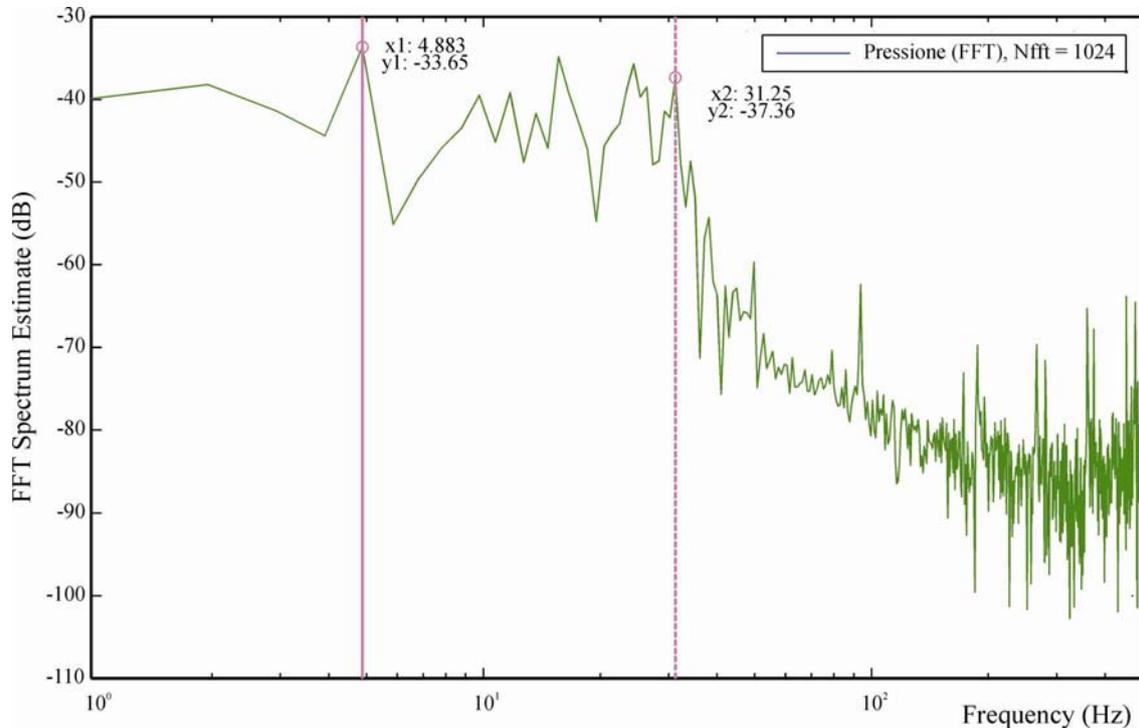


Figura 9. Spettro di potenza della sollecitazione dinamica agente sul fondo della vasca di dissipazione a monte dei *baffle piers* (P2) (grandezze nella scala del modello).

#### 4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Dall’analisi del moto della corrente nel modello possono trarsi le seguenti considerazioni conclusive:

–le misure di pressione effettuate in corrispondenza del cambio di pendenza tra galleria e scivolo hanno confermato l’assenza di depressioni ed, a maggior ragione, l’assenza di rischi di fenomeni di cavitazione nel prototipo;

–Il risalto rimane ben confinato nella vasca di dissipazione. La maggior parte del fenomeno dissipativo è concentrato, come era lecito attendersi, tra l’inizio dei chute blocks ed i *baffle piers*, mentre a valle di questi ultimi la corrente è molto più stabile, anche se è ancora fortemente aerata e turbolenta;

–In corrispondenza del tronco di canale divergente a valle della vasca di dissipazione la corrente ritorna in condizioni supercritiche e tale rimane in tutta la galleria di fuga poiché i tiranti idrici in corrispondenza della confluenza non sono tali da contrastare la spinta della corrente veloce. Le velocità, per la portata di progetto, raggiungono valori intorno ai 9 m/s. Tale situazione comporta la necessità di sistemare opportunamente l’alveo del fiume Chiese nella zona di sbocco, per evitare fenomeni di erosione provocati dalla corrente veloce in uscita dalla galleria.

## **APPENDICE A : SIMILITUDINE DI FROUDE**

Si riportano in questa appendice, i principi salienti della teoria della similitudine di Froude nonché una tabella con i rapporti di scala utili per la comprensione dei dati sopra riportati. Per maggiori dettagli si rimanda ad Adami (1994)<sup>4</sup>.

La similitudine di Froude riguarda il caso del moto di un fluido reale a pelo libero e quindi soggetto all'azione della gravità. Utilizzando lo stesso fluido nel modello e nel prototipo, trascurando gli effetti della tensione superficiale e assumendo che il moto sia turbolento pienamente sviluppato, le condizioni di similitudine che devono essere rispettate sono:

$$r_t = \frac{\lambda}{r_v} \quad r_{\Delta p} = r_v^2 \quad r_v = \lambda^{1/2}$$

in cui  $r_i$  rappresentano i rapporti di scala,  $v$  è la velocità della corrente,  $t$  è il tempo,  $\Delta p$  è la differenza di pressione e  $\lambda$  è il rapporto geometrico di scala.

Una volta fissato il valore di  $\lambda$ , tutti gli altri rapporti discendono di conseguenza.

Per il modello della vasca di dissipazione della galleria di by-pass del lago d'Idro è stato scelto un rapporto di scala  $\lambda = 1/50$  e pertanto le altre grandezze fisiche presentano i seguenti rapporti di scala:

Grandezza	Rapporto di scala
Portata	$rQ = \lambda^{5/2} = 17678$
Velocità	$r_v = \lambda^{1/2} = 7.07$
Tempo	$r_t = \lambda^{1/2} = 7.07$
Frequenza	$r_f = \lambda^{-1/2} = 0.14$
Pressione	$r_p = \lambda = 50$
Forza	$r_F = \lambda^3 = 125\ 000$
Coeff. di scabrezza (Strickler)	$r_k = \lambda^{1/6} = 1.92$

---

<sup>4</sup> Adami A. (1994), *I modelli fisici nell'idraulica*, Ed. CLEUP, Padova. 19

# **APPENDICE B : PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DEL MODELLO FISICO**

## **B.1 POSIZIONAMENTO E SCELTA DELLA SCALA GEOMETRICA**

Il modello fisico è stato realizzato all'interno del Laboratorio di Idraulica del DICATeA, presso la sede scientifica della Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Parma.

Come specificato nella sezione 2.1, sono stati riprodotti:

- 1) un breve tratto terminale della galleria policentrica, il raccordo tra galleria policentrica e galleria a base piana (20 m), il tratto di galleria a base piana (20 m);
- 2) lo scivolo di raccordo tra la galleria e la vasca di dissipazione;
- 3) la vasca di dissipazione vera e propria, (larghezza 12 m, lunghezza di 23 m) comprensiva dei blocchi di dissipazione del gradino terminale e della copertura;
- 4) il restringimento previsto a valle della vasca medesima;
- 5) il canale di restituzione.

Il modello fisico si sviluppa prevalentemente in lunghezza ed in modo rettilineo<sup>5</sup>; tale caratteristica ne ha consentito la collocazione all'interno di un canale a sezione rettangolare e pendenza variabile (Armfield S6MkII) presente nel laboratorio e già utilizzato per altri modelli, sfruttandone anche il circuito idraulico di alimentazione. La sezione utile della S6MkII è caratterizzata da una larghezza pari a 300 mm e da un'altezza di poco superiore a 450 mm, mentre la lunghezza è pari a 10 m.

Queste dimensioni hanno imposto un limite superiore nella scelta della scala del modello. Infatti, entro i sopracitati 300 mm, deve trovar spazio l'elemento del prototipo che presenta il maggiore ingombro trasversale, rappresentato dal canale di restituzione, con i suoi 15 m di larghezza effettiva. Sfruttando appieno la sezione della canaletta, il massimo rapporto di scala (minimo denominatore) che ha permesso il posizionamento voluto risulta pari a 1:50 (scala geometrica).

## **B.2 CONSIDERAZIONI SULLA SCABREZZA DELLA GALLERIA POLICENTRICA**

Per riprodurre correttamente in scala i fenomeni idraulici in cui la resistenza gioca un ruolo rilevante, come è il caso del moto a pelo libero all'interno della galleria, occorre che sia rispettata la condizione di uguaglianza della cadente tra modello e prototipo. Ciò comporta, ammettendo il moto assolutamente turbolento anche nel modello, che il rapporto tra i coefficienti di scabrezza di Gauckler-Strickler sia pari al rapporto di scala geometrico elevato alla potenza 1/6 ovvero, nel caso in esame, pari a 1.92. La galleria policentrica sarà realizzata (nel prototipo) in calcestruzzo, al quale può essere attribuito un coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler intorno a  $70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Ciò significa che, nella scala geometrica scelta, si dovrebbe utilizzare nel modello un materiale con scabrezza pari a  $134 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ . Per la realizzazione del modello fisico (ed in particolare della galleria) si è optato per l'utilizzo del plexiglass (PMMA) che, una volta lucidato, è uno dei materiali più lisci disponibili in commercio ed è quello con le caratteristiche economiche e di lavorabilità che più si prestano allo scopo del presente lavoro. Inoltre il plexiglass è trasparente e consente di visionare

---

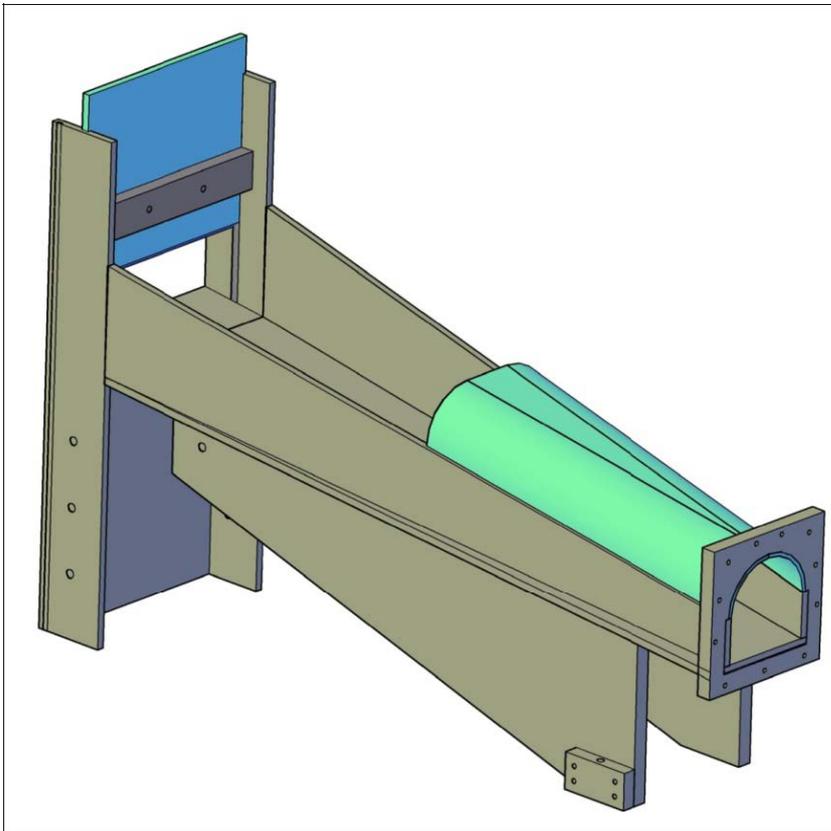
<sup>5</sup> In realtà il tracciato planimetrico della galleria policentrica presenta un andamento curvilineo; tuttavia, si è convenuto che, ai fini di una corretta modellazione del funzionamento della vasca di dissipazione non fosse necessario riprodurre tale caratteristica.

integralmente le caratteristiche del flusso. Tuttavia questo materiale è accreditato di valori del coefficiente di scabrezza secondo Gauckler-Strickler tra 110 e 120  $m^{1/3}/s$ , un po' troppo bassi per modellare nella scala geometrica scelta la galleria policentrica. Considerato che l'obiettivo del modello fisico non era quello di riprodurre rigorosamente il moto il galleria ma piuttosto il comportamento della vasca di dissipazione, tale approssimazione è stata considerata accettabile.

## B.2 COSTRUZIONE DEL MODELLO

Il modello è costituito da quattro conci principali e dalle relative intelaiature di sostegno.

Il primo concio (Figura B.1), costituito da elementi in PVC opportunamente sagomati e incollati tra loro, non riproduce alcuna struttura realmente esistente nel prototipo, ma svolge una funzione di raccordo tra la vasca di alimentazione e l'imbocco della galleria.

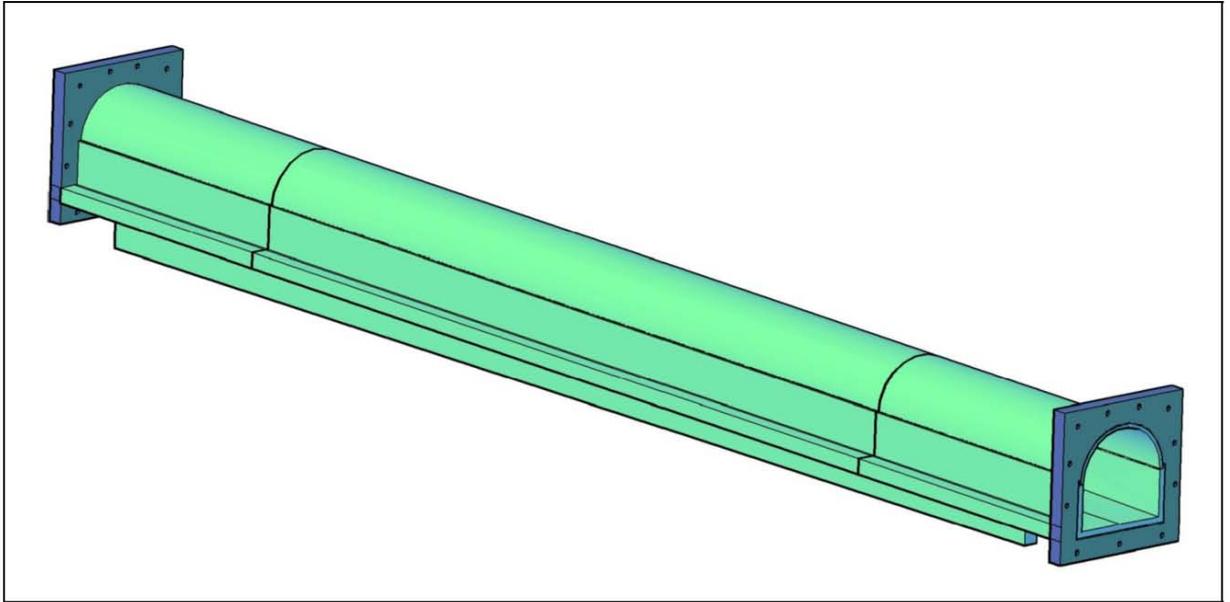


**Figura B.1. Concio di imbocco.**

È costituito da uno scivolo convergente a cui è sovrapposta, nel tratto terminale, una copertura in plexiglass. Lo scivolo, unitamente alla paratoia regolabile posta all'estremo di monte, ha lo scopo di ripristinare in breve spazio le condizioni idrodinamiche che la corrente assume all'interno della galleria a ferro di cavallo.

Il secondo concio (Figura B.2) riproduce un tratto della galleria a ferro di cavallo (per uno sviluppo nel reale di 60 m) e il raccordo tra la stessa e il tratto di galleria a base piana (20 m). Per accompagnare l'ingresso del fluido nella galleria, il tratto di raccordo è stato riprodotto anche a monte del concio, ovviamente in modo speculare rispetto a quello posto a valle. Il fondo e le pareti laterali della galleria sono stati lavorati per fresatura a controllo numerico a partire da elementi prismatici in PMMA di spessore pari a 25 mm. La cupola è invece stata ricavata tagliando a metà

un tubo (sempre in PMMA) avente l'opportuno diametro (130 mm). I pezzi così ottenuti sono stati incollati con cura, evitando sbavature che avrebbero generato perturbazioni indesiderate della corrente. Tutti gli elementi in PMMA sono stati lucidati per garantirne la totale trasparenza.



**Figura B.2. Concio che riproduce una tratto della galleria policentrica ed il raccordo della stessa con il tratto di galleria a base piana.**

Il raccordo tra i primi due concii (così come quello tra il secondo e il terzo) è stato realizzato tramite flange saldate alle estremità dei concii stessi (Figura B.3). Questa soluzione consente una maggiore elasticità in fase di assemblaggio; inoltre, l'asolatura che ospita i bulloni per il fissaggio permette di recuperare eventuali imprecisioni della lavorazione o dell'incollaggio.



**Figura B.3. Flange applicate alle estremità di alcuni concii del modello per realizzare il collegamento a tenuta tra gli stessi. A destra è visibile l'O-ring (di colore rosso) alloggiato nella propria sede.**

Il terzo concio (Figura B.4), anch'esso completamente trasparente, riproduce un tratto di galleria a base piana e lo scivolo che conduce alla vasca di dissipazione. Al termine di tale scivolo sono stati incollati i chute blocks, così come previsto dal progetto (Figura B.5a).

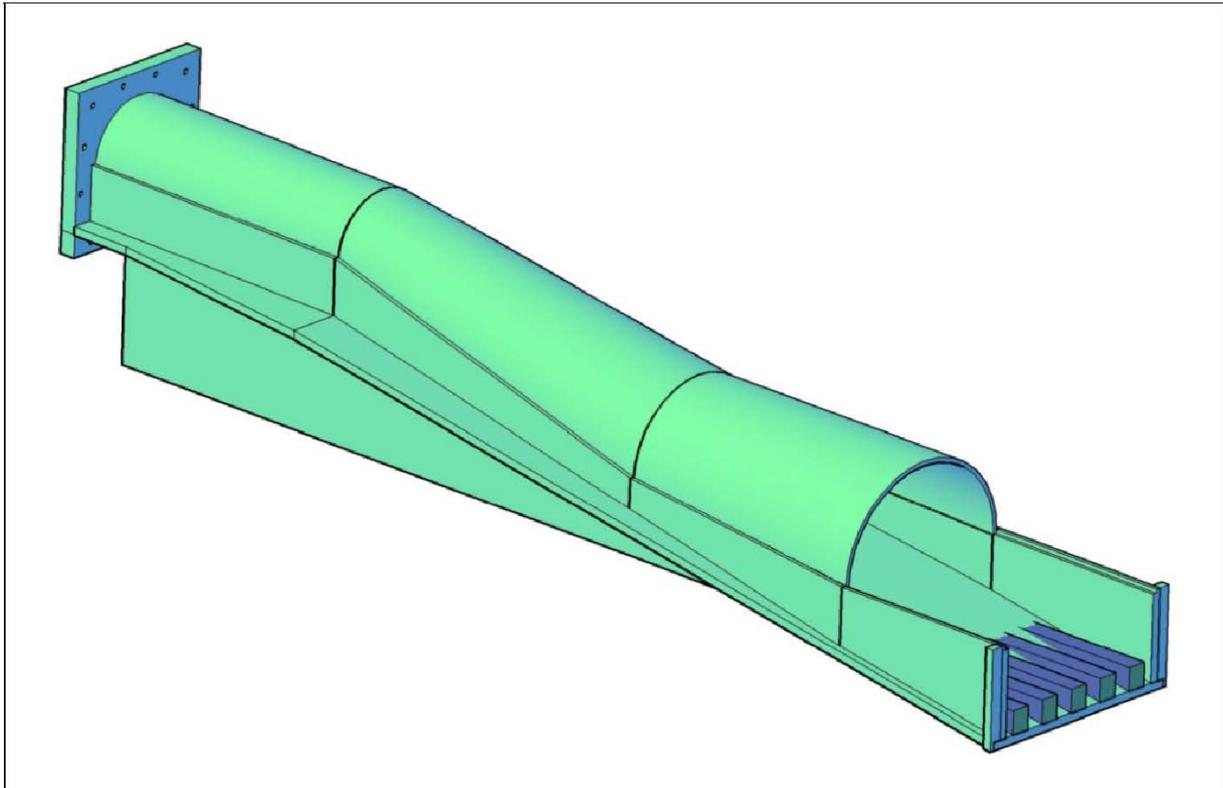
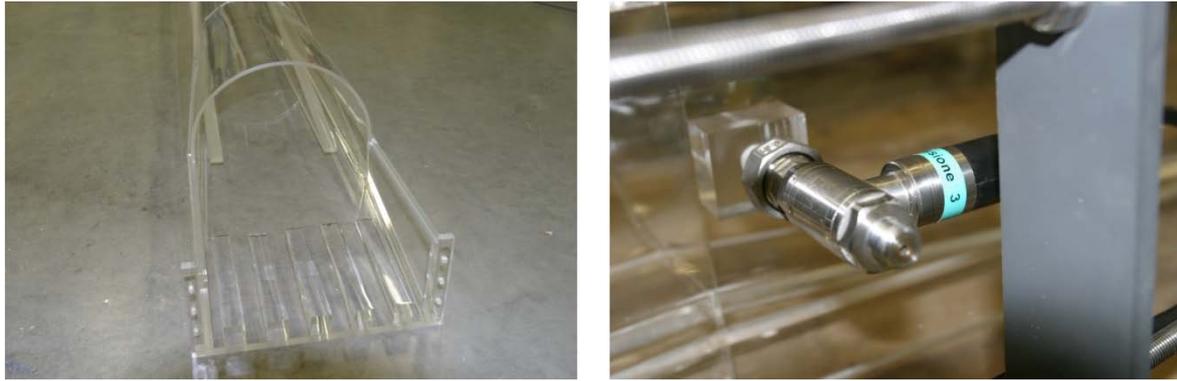


Figura B.4. Concio che riproduce il tratto di galleria a base piana e lo scivolo che precede l'ingresso nella vasca di dissipazione, compresi i *chute-blocks*.

Poco più a valle del cambio di pendenza è collocata (e strumentata) una presa di pressione. Per garantire il contatto tra l'ambiente di misura e la sonda si è realizzato sul fondo un foro di piccolo diametro (2 mm). Collocare il trasduttore di pressione lontano rispetto alla presa avrebbe richiesto l'utilizzo di un tubo per connettere l'uno all'altra. In tale configurazione, il condotto di collegamento si comporta come un filtro passa-basso e taglia le componenti del segnale caratterizzate dalle frequenze più elevate. Per ovviare a tale inconveniente la strumentazione è stata posizionata il più vicino possibile alla presa, tramite l'impiego di un piccolo elemento prismatico in PMMA. Questo è stato opportunamente forato e incollato all'esterno del modello, in modo che fungesse da raccordo tra presa e trasduttore, come riportato in Figura B.5b. La stessa soluzione è stata adottata per le celle di pressione sottostanti il fondo della vasca di dissipazione; in tal caso i raccordi sono a gomito, per ridurre gli ingombri.

Il fondo della vasca di dissipazione è costituito da un elemento a sé stante, rialzato di ca. 5 cm rispetto al fondo della canaletta. La lastra in PVC che lo costituisce è stata lavorata in modo che fosse possibile installare agevolmente la strumentazione per la misura della sollecitazione integrale agente su uno dei blocchi di dissipazione. La forza è stata misurata mediante il dispositivo rappresentato nella Figura 5 (cfr Relazione); uno dei baffle piers è stato realizzato in alluminio e presenta al suo interno una cavità in grado di accogliere la parte terminale di una cella di carico a flessione. La scelta dell'alluminio è dovuta essenzialmente ad una migliore lavorabilità e alla necessità di ridurre le masse in gioco a favore di una maggiore risposta in frequenza. A sua volta, la cella di carico è vincolata ad un supporto solidale con il resto del modello. Pertanto il blocco risulta fissato al solo strumento e, se soggetto alla spinta del fluido, può traslare nella direzione principale del flusso con uno spostamento massimo pari a 0.43 mm (deformazione a pieno carico della cella). Il dispositivo è rappresentato nella Figura B.6.



(a) (b)

Figura B.5. (a) *Chute blocks* al termine dello scivolo che precede la vasca di dissipazione. (b) Presa di pressione a valle del cambio di pendenza; si osserva l'elemento in PMMA che funge da raccordo tra il fondo e la cella.

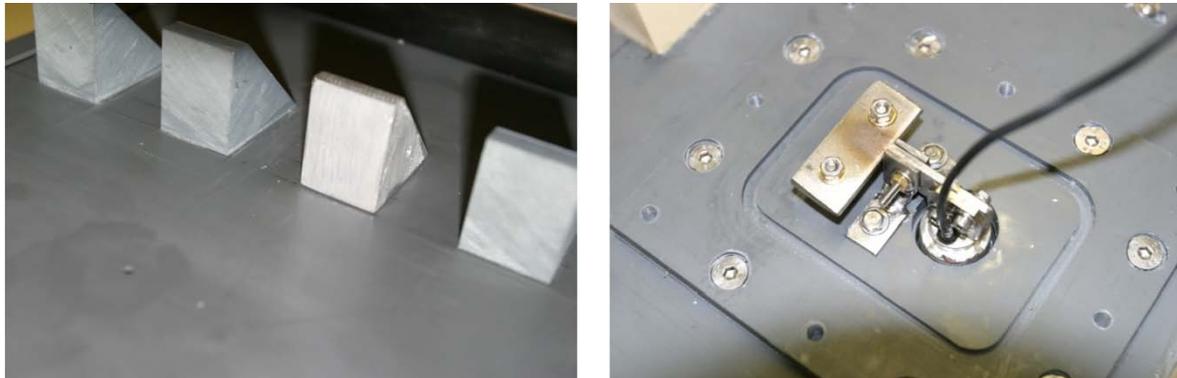


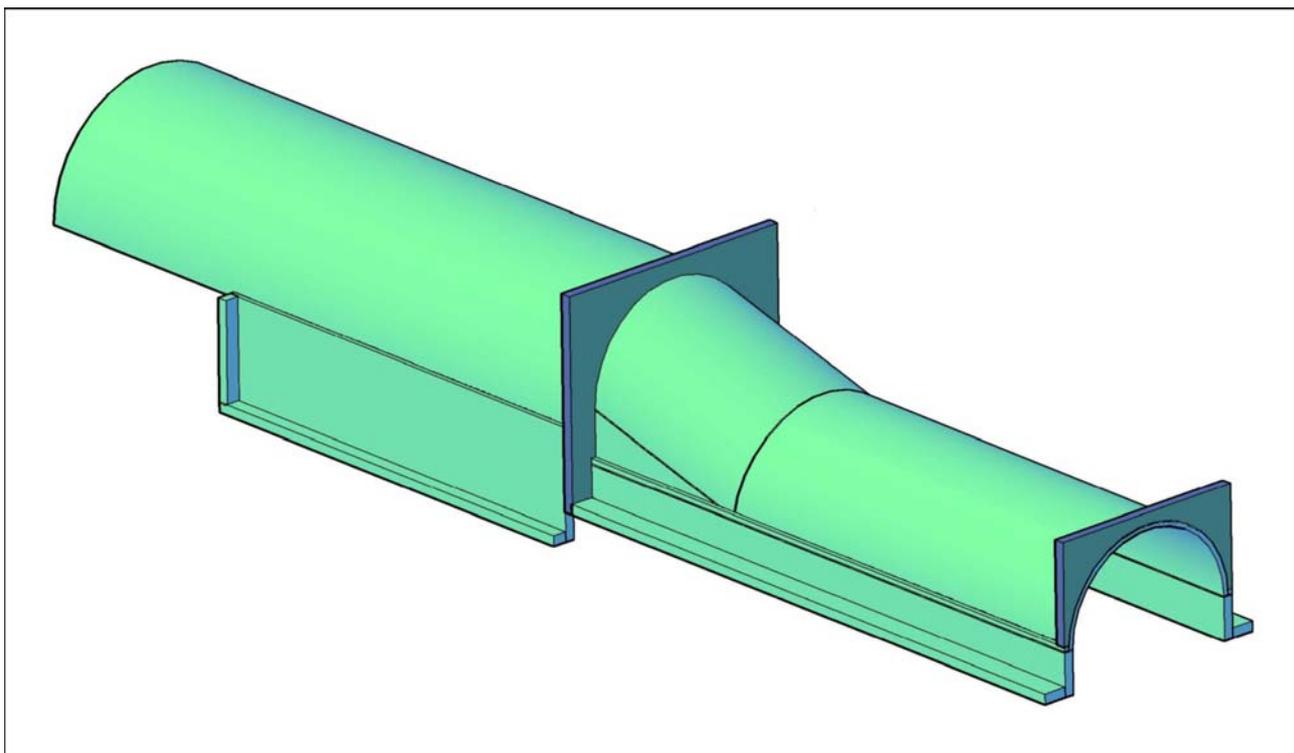
Figura B.6. (a) *Baffle piers* nella vasca di dissipazione; il secondo blocco da destra è quello strumentato e realizzato in alluminio. (b) Vista dal basso dell'ancoraggio tra cella di carico (vincolata al dente) e fondo del modello.

Il gradino al termine della vasca di dissipazione è stato riprodotto in PVC e avvitato al fondo. A valle del gradino si è predisposta una lastra che riproduce la pavimentazione del canale di restituzione, la cui sezione è divisa in due parti da un setto centrale (solo parte terminale).

Il quarto e ultimo concio (Figura B.7) riproduce la copertura della vasca di dissipazione e del primo tratto del canale di restituzione. Questi elementi sono stati realizzati separati dalla parte sottostante in modo da poter essere riutilizzati nel caso si fossero rese necessarie modifiche alla geometria (lunghezza ed altezza) della vasca di dissipazione. La tenuta idraulica, anche in questo caso, è stata garantita tramite l'utilizzo di O-ring opportunamente sagomati.

L'intero modello è poggiano su una serie di supporti in materiale plastico a loro volta poggianti sul fondo della canaletta. L'intelaiatura che regge i primi tre concetti è dotata di piedini di livellamento antivibrazione grazie ai quali è stato possibile regolare in modo accurato le quote (e quindi la pendenza) di ciascun elemento che costituisce il modello. La regolazione del fondo della vasca di dissipazione (e del canale di restituzione) è stata eseguita tramite l'inserzione di spessori calibrati nella fase di assemblaggio.

Tutti i cavi provenienti dalla strumentazione sono stati schermati e trasferiti all'elettronica per l'acquisizione.



**Figura B.7.** Concio che riproduce la copertura della vasca di dissipazione e del primo tratto del canale di restituzione.

## **APPENDICE C : STRUMENTAZIONE**

## C.1 MISURA DEI LIVELLI IDRICI

L'acquisizione dei livelli idrici è stata effettuata mediante sensori ad ultrasuoni, modello Q45UR, prodotti dalla Banner.

Lo strumento (Figura C.1) è settato per fornire un'uscita analogica in tensione tra 0 e 10 Volt ed ha un range di misura compreso tra 50 e 250 mm dal sensore, con caratteristica quasi lineare e tempo di risposta regolabile tra 10 e 320 ms. La risoluzione della sonda ad ultrasuoni è di 0.2 mm, con limitazioni minime dovute alla scheda di acquisizione. La scheda utilizzata, a 16 bit, campiona 65536 punti su un range di  $\pm 10$  V.

Quindi:

$$\frac{20}{2^{16}} \approx 3.05 \cdot 10^{-4} \left( \frac{V}{punto} \right)$$

Poiché il range utile di misura è di 200 mm, la risoluzione spaziale della sonda di livello dovuta alla risoluzione della scheda di acquisizione può essere espressa nel modo seguente:

$$\frac{200}{10} \left( \frac{mm}{V} \right) \cdot 3.05 \cdot 10^{-4} \left( \frac{V}{punto} \right) = 0.006 \left( \frac{mm}{punto} \right)$$

Gli effetti dovuti alla non linearità sono stati ridotti grazie alla calibrazione per segmenti che è stata eseguita nella fase preliminare del lavoro, mentre l'errore di ripetibilità è pari allo 0.1% del valore misurato. Cautelativamente, l'accuratezza che può essere attribuita al sistema di acquisizione dei livelli è pari a  $\pm 0.5$  mm. Le caratteristiche tecniche del trasduttore ad ultrasuoni sono riportate nella Tabella C.1.

È stata utilizzata una sola sonda installata su di un apposito supporto mobile, in grado di posizionarsi ovunque fosse necessario al di sopra del modello.

<b>Misuratore di distanza "Banner" U-GAGE Q45UR</b>	
Tipo sensore	piezoelettrico
Alimentazione	15-24 V dc
Uscita	0-10 V dc
Tempo di risposta	10-320 ms (settabile)
Risoluzione	0.2 mm
Ripetibilità	0.1% del fondo scala
Intervallo di misura	50-250 mm
Temperatura di esercizio	da -25 a 70 °C

Tabella C.1. Specifiche tecniche trasduttore di livello ad ultrasuoni.



Figura C.1. Trasduttore di livello ad ultrasuoni.

## C.2 MISURA DELLE PORTATE

Per la misura della portata si è utilizzato un misuratore elettromagnetico prodotto dalla ditta Endress+Hauser, modello PROMAG 33 (Figura C.2). Il misuratore ha un diametro nominale pari a 100 mm.



Figura C.2. Trasduttore di portata elettromagnetico.

L'installazione nel circuito idraulico rispetta le prescrizioni della ditta costruttrice la quale richiede che lo strumento, affinché la misura non sia soggetta a disturbi o interferenze, sia preceduto da un tratto rettilineo di lunghezza almeno pari a dieci diametri nominali e seguito da un tratto rettilineo pari ad almeno cinque diametri nominali. Il flussometro ha un'accuratezza pari a  $\pm 0.5\%$  della lettura. Il dispositivo è dotato di un display sul quale sono visualizzati il valore istantaneo di portata ed il volume totale transitato. La Tabella C.2 riporta le specifiche tecniche del flussometro.

<b>Misuratore di portata Endress+Hauser Promag 33</b>	
Tipo sensore	elettromagnetico
DN	100 mm
PN	16 bar
Alimentazione	220 V
Uscita	0/4-20 mA
Condizione di installazione	In ingresso > 10×DN (tubo dritto) In uscita > 5×DN (tubo dritto)
Accuratezza	± 0.5% del valore misurato
Portata massima (Qmax DN)	78.5 l/s

Tabella C.2. Specifiche tecniche del flussometro magnetico.

### C.3 MISURA DELLE PRESSIONI

La strumentazione impiegata per eseguire queste misure è costituita da tre manometri differenziali, prodotti dalla ditta "Druck" e appartenenti alla serie PDCR 2100 (Figura C.3).



Figura C.3. Trasduttore di pressione.

Questi trasduttori si distinguono per l'elevata precisione e affidabilità e per la stabilità a lungo termine delle caratteristiche metrologiche. La parte sensibile dello strumento è realizzata in acciaio inox 316L. L'uscita è un segnale in tensione compreso tra 0 e 50 mV. Lo strumento è caratterizzato da un'accuratezza complessiva pari a  $\pm 0.1\%$  BSL; tale stima è ottenuta combinando gli errori di linearità e di ripetibilità e gli effetti dovuti all'isteresi. Nel modello sono stati utilizzati trasduttori caratterizzati da una pressione nominale pari a 350 mbar. Le caratteristiche tecniche di questi strumenti sono riportate nella Tabella C.3.

<b>Misuratore di pressione "Druck" PDCR 2100</b>	
Tipo sensore	ponte estensimetrico completo
Alimentazione	10 V dc
Uscita	0-50 mV dc
Accuratezza	$\pm 0.1\%$ BSL
Intervallo di misura	0-350 mbar
Temperatura di esercizio	da -20 a 80 °C

Tabella C.3 – Specifiche tecniche trasduttore di pressione.

#### C.4 MISURA DELLE FORZE

La forza agente su uno dei denti di dissipazione è stata misurata per mezzo di una cella di carico sensibile alla flessione prodotte dalla Vishay Transducers, modello Alpha Load Beam (Figura C.4).



Figura C.4. Trasduttore di forza.

L'apparato di misura, contenuto all'interno della cella, è un ponte estensimetrico completo, alimentabile in corrente continua con tensioni fino a 20 V DC. L'uscita del sistema è un segnale in tensione. Il fondo-scala è di 50 N. L'errore combinato, pari allo 0.1 % della lettura, consente misure estremamente accurate. Una caratteristica importante, soprattutto nel caso applicativo in esame, è la freccia massima al carico nominale (deformazione massima a flessione dello strumento, quando questo è sollecitato dal carico nominale) inferiore a 0.5 mm. Le caratteristiche tecniche dello strumento sono riportate nella Tabella C.4.

<b>Misuratore di forza Vishay Alpha LB</b>	
Tipo sensore	ponete estensimetrico completo
Alimentazione	1-20 V dc
Uscita	segnale in tensione
Errore combinato	$\pm 0.1\%$ del valore misurato
Freccia MAX al carico nominale	0.5 mm
Carico nominale	50 N
Temperatura di esercizio	da 10 a 80 °C

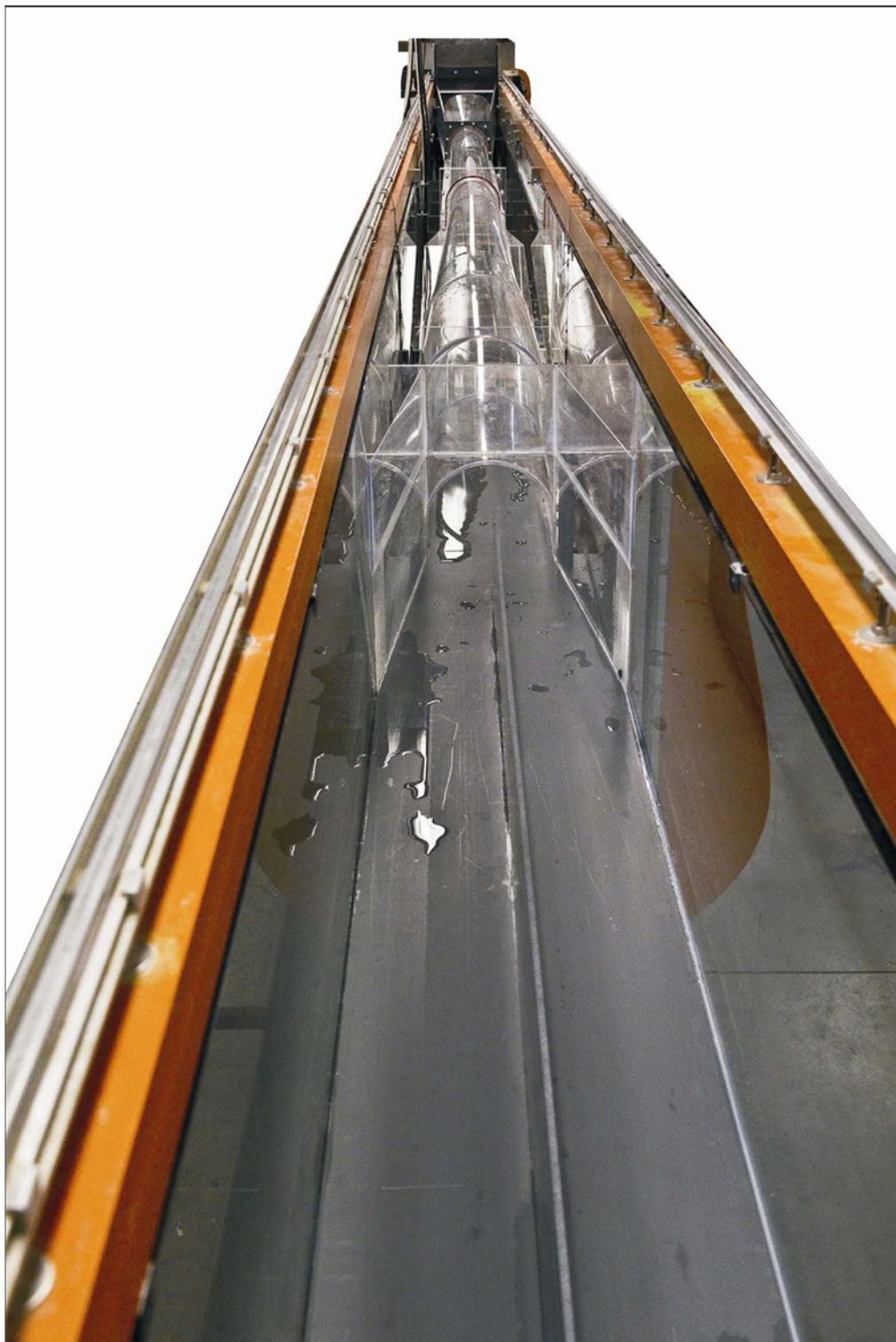
Tabella C.4 – Specifiche tecniche trasduttore di forza.

## **C.5 CALIBRAZIONE DEI TRASDUTTORI DI FORZA E DI PRESSIONE**

I trasduttori di pressione sono stati calibrati staticamente mediante l'impiego di un calibratore Druck modello DPI600. Tutte le sonde hanno dimostrato un'elevata linearità all'interno dell'intero campo di esercizio.

La calibrazione del sistema di misura delle forze è stata eseguita ponendo in posizione verticale l'elemento che costituisce il fondo della vasca di dissipazione e caricando la faccia del blocco contro la quale impatta la corrente, che in questa configurazione si trova in posizione orizzontale, con pesi noti. Contemporaneamente il segnale in uscita dalla cella di carico è stato acquisito e associato alla sollecitazione corrispondente.

# **APPENDICE D : DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA**



**Figura D.1. Vista da valle del modello completamente assemblato.**



Figura D.2. Funzionamento della vasca di dissipazione per una portata di 6.79 l/s, corrispondenti a 120 mc/s nel prototipo.



Figura D.3. Funzionamento della vasca di dissipazione per una portata di 11.32 l/s, corrispondenti a 200 mc/s nel prototipo.

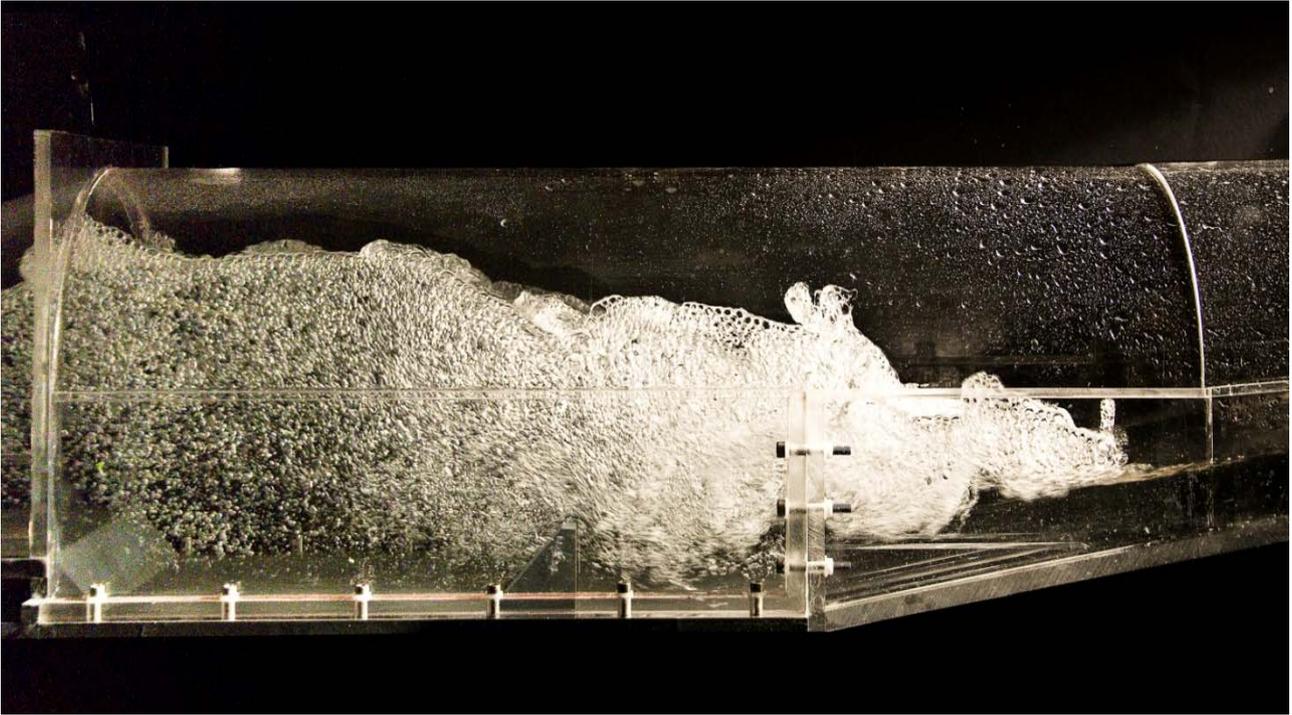


Figura D.4. Funzionamento della vasca di dissipazione per una portata di 18.78 l/s, corrispondenti a 332 mc/s nel prototipo.

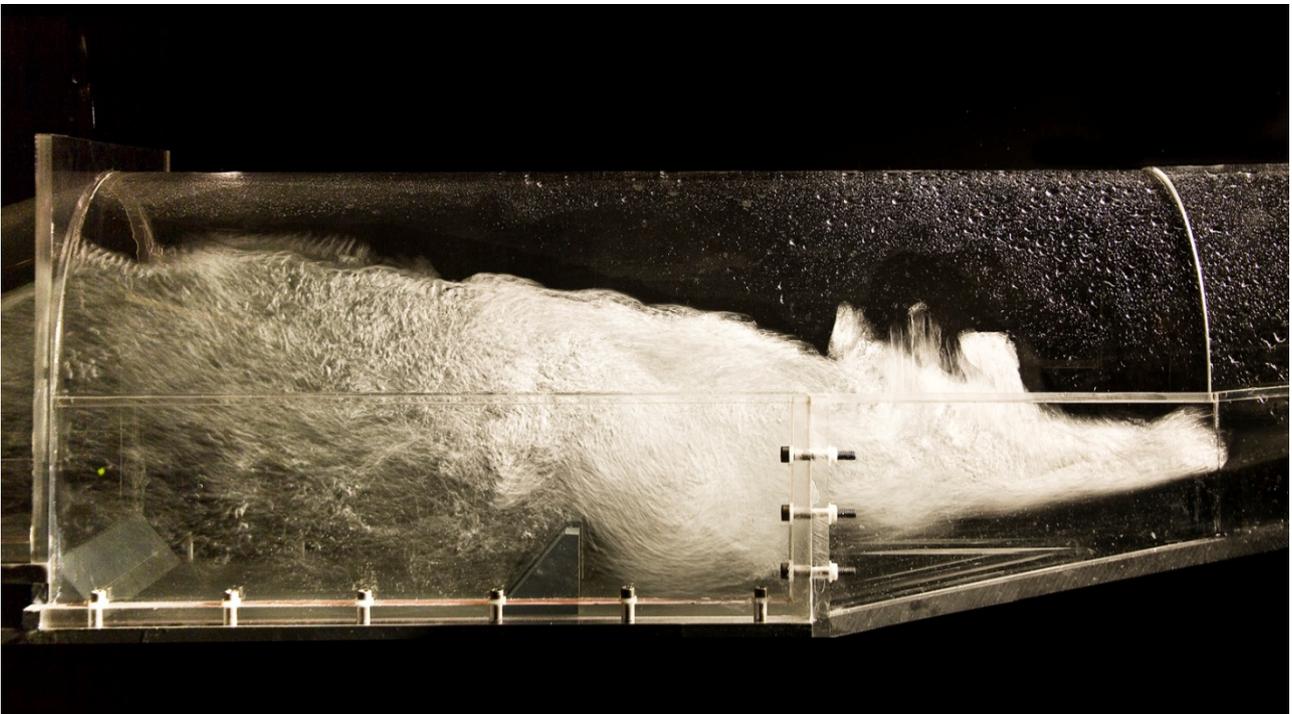


Figura D.5. Funzionamento della vasca di dissipazione per una portata di 18.78 l/s, corrispondenti a 332 mc/s nel prototipo. Immagine con tempo di scatto più lungo.

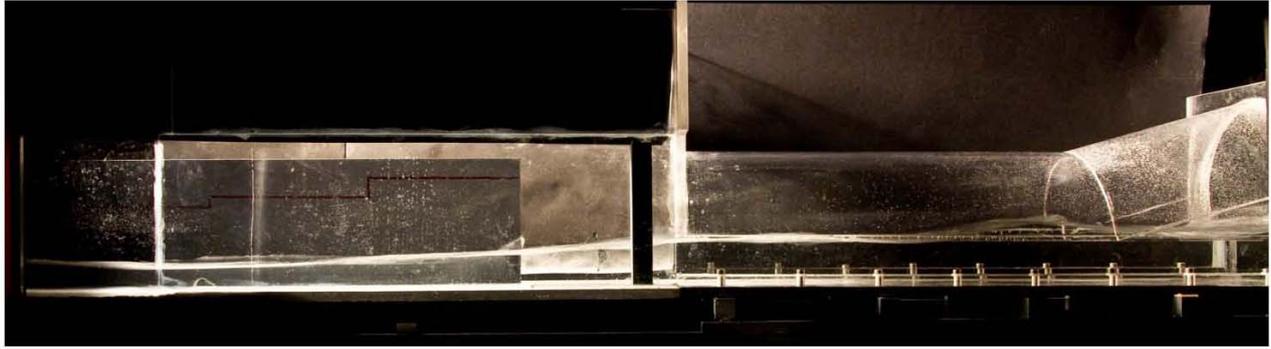


Figura D.6. Profilo della corrente nel tratto a valle della vasca di dissipazione per una portata di 6.79 l/s, corrispondenti a  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  nel prototipo.

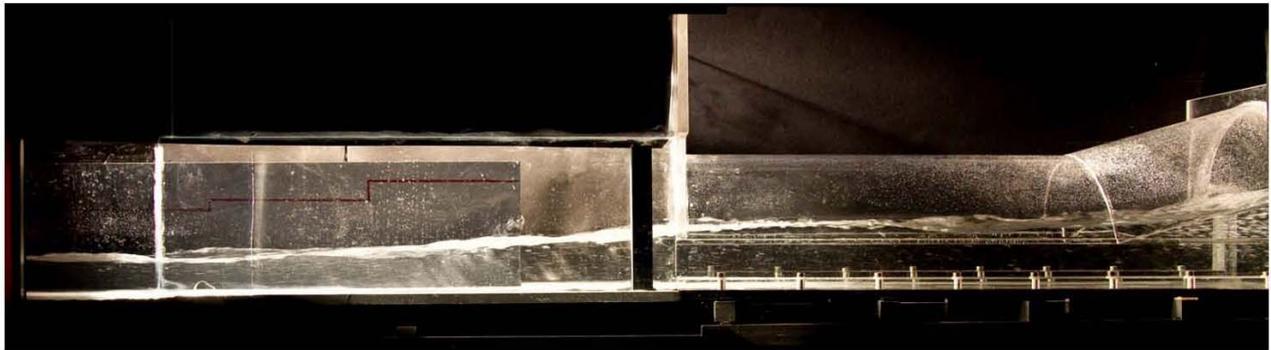


Figura D.7. Profilo della corrente nel tratto a valle della vasca di dissipazione per una portata di 11.31 l/s, corrispondenti a  $200 \text{ m}^3/\text{s}$  nel prototipo.



Figura D.8. Profilo della corrente nel tratto a valle della vasca di dissipazione per una portata di 18.78 l/s, corrispondenti a  $332 \text{ m}^3/\text{s}$  nel prototipo.

# **APPENDICE E : CALIBRAZIONE DEGLI STRUMENTI**



Dipartimento di Ingegneria Civile, dell' Ambiente,  
del Territorio ed Architettura  
DICATeA - UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

## **MODELLO FISICO DELLA VASCA DI DISSIPAZIONE AL TERMINE DELLA GALLERIA DI BYPASS DEL LAGO D'IDRO: CALIBRAZIONE DEGLI STRUMENTI.**

### **Responsabilità scientifica:**

Prof. Ing. Paolo Mignosa (DICATeA)

### **Gruppo di lavoro:**

Ing. Luca Chiapponi, Ing. Marco D'Oria

Parma (Pr), 28 Aprile 2010

### **1. Trasduttori di pressione**

Per la misura della pressione ci si è affidati a 3 manometri differenziali, prodotti dalla ditta "Druck" e appartenenti alla serie PDCR 2100. Tali strumenti sono caratterizzati da un'accuratezza pari a  $\pm 0.1$  % BSL (Best Straight Line). La curva di calibrazione di ciascuno strumento è stata ottenuta nel Laboratorio di Idraulica del DICATeA (Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Ambiente, del Territorio e architettura), mediante l'impiego di un "calibratore" Druck DPI 601-F. Questo dispositivo è in grado di generare pressioni note in un range compreso tra -50 e 200 mbar e con un'accuratezza pari allo 0.25 %.

La procedura di calibrazione consiste (a) nel sollecitare lo strumento da tarare con un ingresso noto, generato tramite il "calibratore"; (b) nel acquisire l'uscita dello strumento calibrando tramite un opportuno sistema di acquisizione (risoluzione pari a 0.003 mV); (c) nell'eseguire una regressione lineare che porti alla determinazione della curva (in questo caso una retta) che meglio interpreta la relazione tra input e output dello strumento.

Di seguito si riportano le curve di taratura ottenute per ciascuno dei tre manometri differenziali; vedi Figure 1, 2 e 3.

In Allegato 1 si riporta il certificato di taratura del dispositivo di calibrazione, rilasciato dal laboratorio di via Magenta 77, RHO (MI), della ditta GE-Sensing.

### **2. Trasduttore di forza**

La misura delle forze agenti su uno dei blocchi di dissipazione è stata eseguita tramite un apparato complesso, realizzato direttamente nel suddetto Laboratorio del DICATeA.

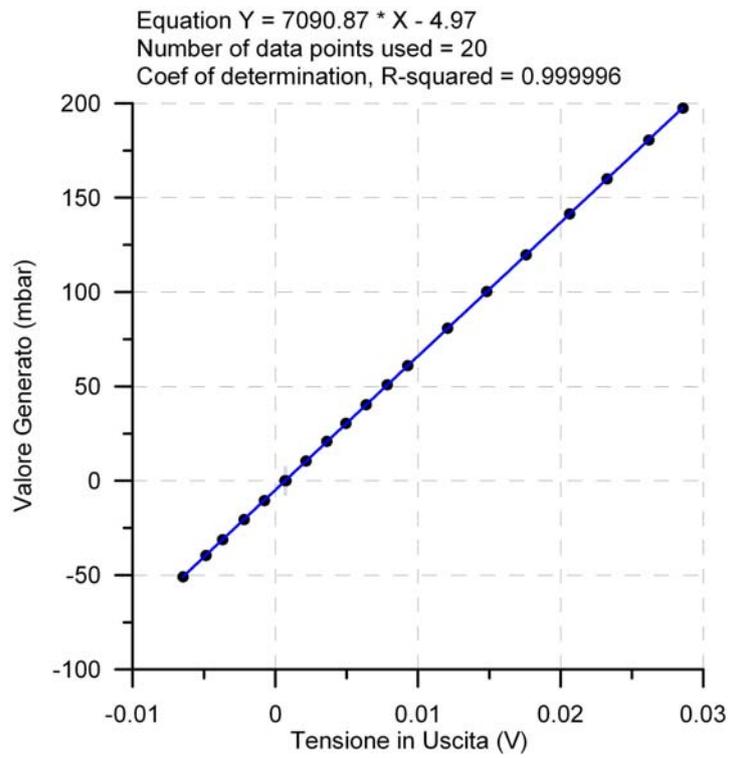


Figura 1. Curva di taratura della cella di pressione installata a monte dei "baffle piers" nella vasca di dissipazione.

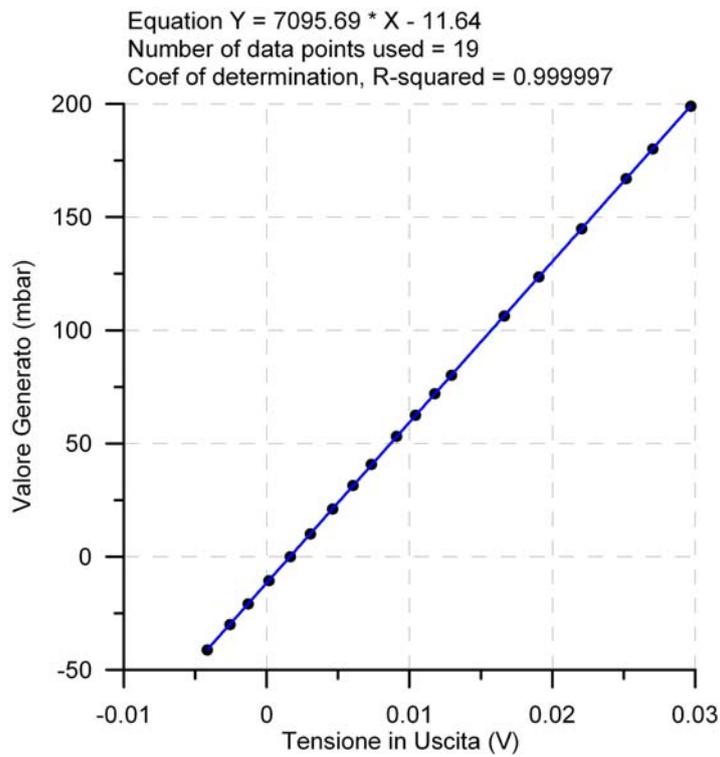


Figura 2. Curva di taratura della cella di pressione installata a valle dei "baffle piers" nella vasca di dissipazione.

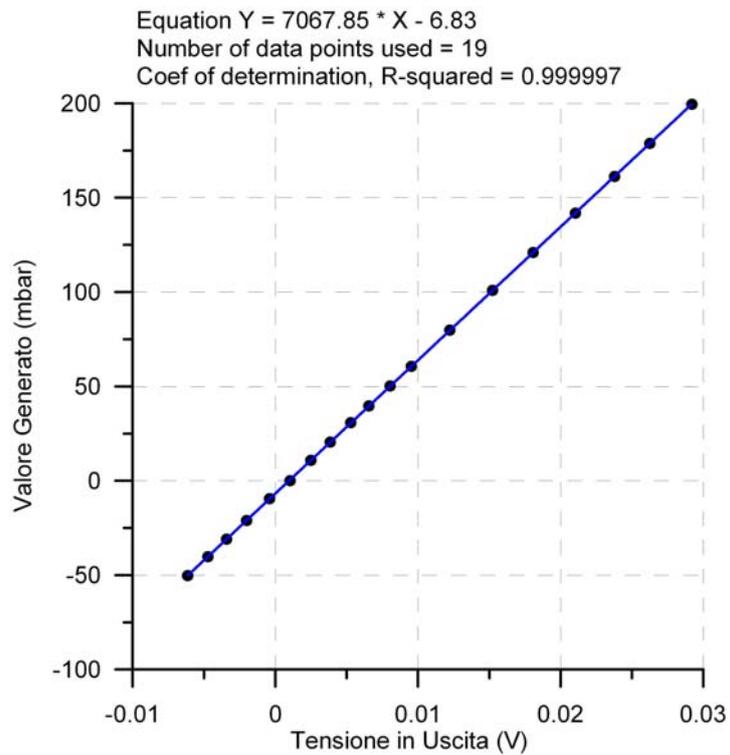


Figura 3. Curva di taratura della cella di pressione installata in corrispondenza del cambio di pendenza in galleria.

La Figura 4 riporta una sezione della lastra in PVC che riproduce il fondo della vasca di dissipazione. Sono messi in evidenza il dente strumentato, la camera stagna che contiene la cella di carico (Alpha Load Beam - in grado di lavorare a flessione), la cella stessa e i relativi elementi di supporto.

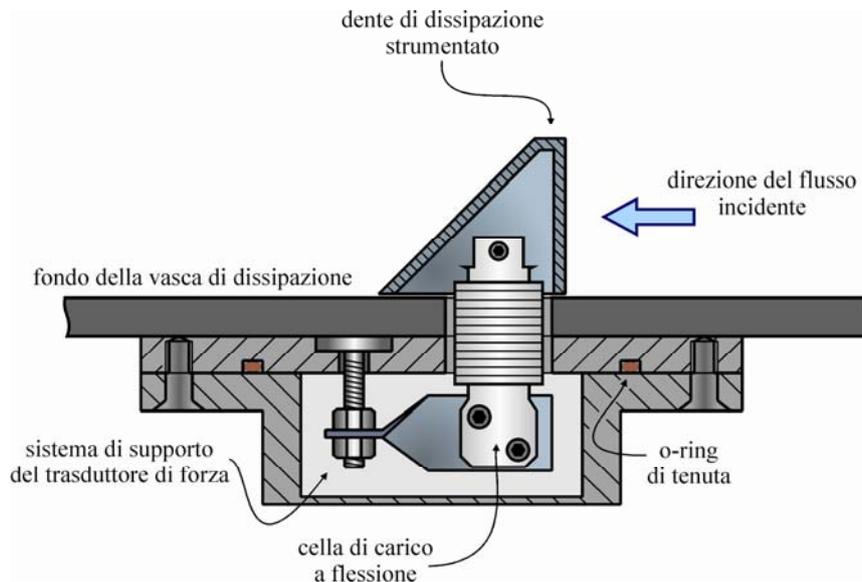


Figura 4. Schema del dispositivo per la misura della sollecitazione integrale sul blocco di dissipazione.

La calibrazione del sistema di misura delle forze è stata eseguita ponendo in posizione verticale l'elemento che costituisce il fondo della vasca di dissipazione e caricando la faccia del blocco contro la quale impatta la corrente, che in questa configurazione si trova in posizione orizzontale, con pesi noti, misurati con una bilancia la cui accuratezza è pari a  $\pm 0.1$  g; vedi Allegato 2. Contemporaneamente il segnale in uscita dalla cella di carico è stato acquisito (risoluzione pari a 0.3 mV) e associato alla sollecitazione corrispondente. La curva di taratura ottenuta è riportata nella Figura 5.

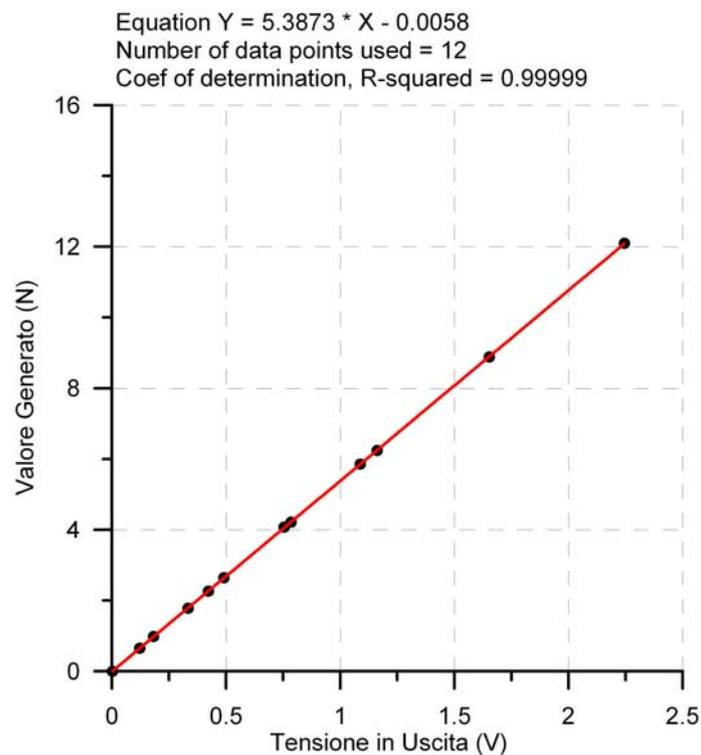


Figura 5. Curva di taratura del sistema di misura delle forze.

L'Allegato 6 riporta le caratteristiche della cella di carico Alpha Load Beam.

### 3. Misuratore di portata

Per il misuratore di portata elettromagnetico (Promag 33) si riporta nell'Allegato 3 parte del manuale operativo (pagg. 108-109) contenente i dati tecnici e curva di taratura.

### 4. Misuratore di livello

Per il misuratore di livello ad ultrasuoni si riportano le specifiche tecniche nell'Allegato 4. Inoltre, è opportuno specificare che lo strumento è stato calibrato per punti al fine di ridurre l'errore di non

linearità nel range di interesse. Si riporta in Figura 6 la curva di taratura ottenuta nel laboratorio del DICATEA. Le distanze in ingresso sono state misurate con un coordinatometro Mitutoyo accurato al centesimo di millimetro.

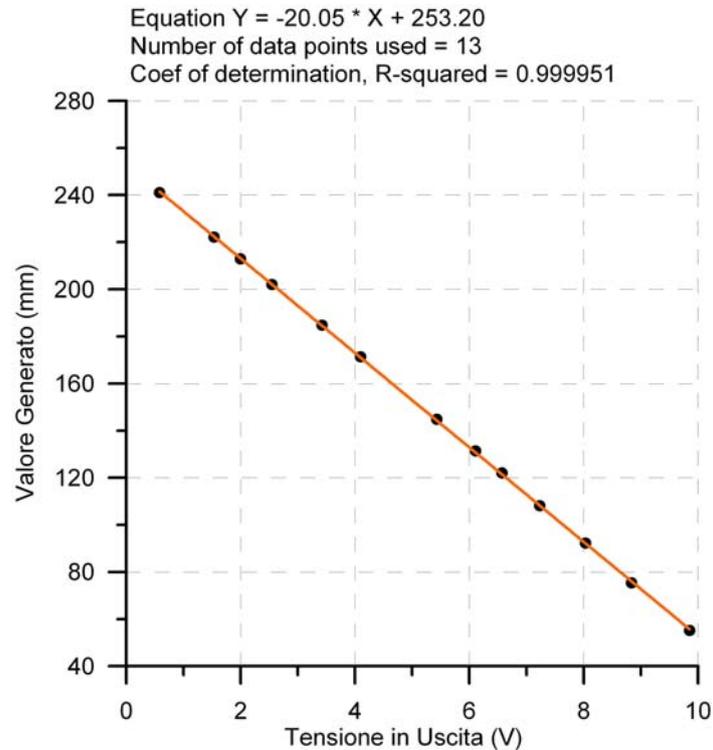


Figura 6. Curva di taratura del misuratore di livello.

## 5. Misuratore di velocità

Per il misuratore di velocità (micro mulinello della ditta Nixon, modello “streamflow 400”) si è fatto riferimento alla curva di taratura fornita dal costruttore e riportata in Allegato 5.

# Allegato 1. Certificato di taratura del dispositivo di calibrazione.



GE Infrastructure  
Sensing

Luogo del laboratorio:  
Via Magenta, 77 - Berlino -  
20017 B. O. Hill - Italia  
T. +39 02 649231  
F. +39 02 6492397  
www.geenergy.com

Druck Italia Srl

## M03 - Modulo di calibrazione

Certificato N. 05/123

UNITA' IN CALIBRAZIONE	INFORMAZIONI
N.ro Commessa : IGA 42170	Campione impiegato : DPI 805
Modello unità : PPI 803-F	Numero di serie : 287086-2
Fondo/Scala : 200 mbar g	Incertezza campione : +/- 0.05 mbar
Costruttore : DRUCK LTD	<b>CONDIZIONI AMBIENTALI</b>
Tensione di lavoro : 6 V <sub>DC</sub>	
Numero di serie : 1420796-1	
Modello Trasduttore esterno : .....	
Numero di Serie Trasduttore : .....	Temperatura ambiente : 21°C
Costruttore Trasduttore ext. : .....	Umidità : 77% RH
Accuratezza nom. catena mis. : +/-0.05%RDG+/-0.01%FS	Gravità locale : 9.8054869 m/sec <sup>2</sup>
Come trovato / Ricalibrato	

### DATI DI CALIBRAZIONE

Valore Generato* (mbar g)	Valore Letto (mbar g)	Valore Ideale ( )	Deviazione (mbar g)	P ***	N ***
0.00	0.00		0.00		
50.00	50.04		+ 0.04		
100.00	100.04		+ 0.04		
150.00	150.04		+ 0.04		
200.00	200.02		+ 0.02		
150.00	150.04		+ 0.04		
100.00	100.04		+ 0.04		
50.00	50.02		+ 0.02		
5.00	- 0.01		- 0.01		

\* Dopo correzione delle variabili di influenza se applicabile

\*\* Il campione impiegato è riferito a condizioni standard: Nazionali o Internazionali

\*\*\* Le colonne di risultato (P) e (N) sono utilizzate esclusivamente nel caso di certificati Come trovato/Ricalibrato

NOTE :

Operatore :

Approvazione :

Data : 11 07 2005

**Allegato 2. bilancia con accuratezza  $\pm 0.1$  g.**



**Allegato 3. Parte del manuale operativo (pagg. 108-109) contenente i dati tecnici e curva di taratura del misuratore di portata PROMAG 33.**

Pron:

9 Technical Data

Promag 33

	<b>Output variables</b>
<i>Mea:</i>	<p><i>Output signal</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Current output:</b> active, 0/4...20 mA, galvanically isolated, <math>R_L &lt; 700 \Omega</math> (with HART: <math>R_L \geq 250 \Omega</math>), time constant selectable (0.01...100 s), full scale value freely selectable, temperature coefficient: typical 0.005 % o.r./°C; resolution: 10 <math>\mu</math>A</li> <li>• <b>Pulse / frequency output:</b> active/passive selectable, galvanically isolated active: 24 V DC, 25 mA (max. 250 mA during 20 ms), <math>R_L &gt; 100 \Omega</math> passive: Open Collector, 30 V DC, 250 mA</li> </ul> <p>Frequency output: Full scale frequency 2...10000 Hz, pulse/pause ratio 1:1, pulse width max. 2 s</p> <p>Pulse output: Pulse value and pulse polarity selectable Pulse width adjustable (0.05...2 s) Above a frequency of 1 / (2 x pulse width) the pulse/pause ratio is 1:1</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Alarm output (Relay 1):</b> Either NC or NO via a jumper available (factory setting: NO contact) max. 60 V AC / 30 V DC; max. 0.5 A AC / 0.1 A DC, galvanically isolated. Configurable for: error message (failure), empty pipe detection (EPD), failure + EPD, full scale switching, batch precontact, direction of flow, limit value 1 and overflow (<math>v &gt; 12.5</math> m/s)</li> <li>• <b>Status output (Relay 2):</b> Either NC or NO via a jumper available (factory setting: NC contact) max. 60 V AC / 30 V DC; max. 0.5 A AC / 0.1 A DC, galvanically isolated. Configurable for: empty pipe detection (EPD), full scale switching, batch contact, direction of flow, limit value 2 and overflow (<math>v &gt; 12.5</math> m/s)</li> </ul>
<i>Repr:</i>	
<b>Inst:</b>	
<i>Insta</i>	<p><i>Signal on alarm</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Current output → failsafe mode selectable (see page 51)</li> <li>• Pulse/frequency output → failsafe mode selectable (see page 57)</li> <li>• Relay 1 output → de-energised on "FAILURE" or power failure</li> <li>• Relay 2 output → de-energised on power failure</li> </ul> <p>Error response of outputs (detailed description) → see page 85</p>
<i>Inlet</i>	
<i>Coni (rem)</i>	<p><i>Load</i></p> <p><math>R_L &lt; 700 \Omega</math> (current output)</p> <p><i>Creep suppression</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Switching points selectable (see page 72)</li> <li>• Max. creepage depends on the nominal diameter at <math>v = 1</math> m/s</li> <li>• Hysteresis: 50% of set creepage</li> </ul>
	<b>Accuracy</b>
	<p><i>Reference conditions</i></p> <p>According to DIN 19200 and VDI/VDE 2641:</p> <p>Fluid temperature +28 °C ± 2 K Ambient temperature +22 °C ± 2 K Warm up period 30 minutes</p> <p>Mounting</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Inlet section &gt; 10 x DN</li> <li>- Outlet section &gt; 5 x DN</li> <li>- Transmitter and sensor are grounded.</li> <li>- The sensor is built-in centered into the piping.</li> </ul>

Endr

108

Endress+Hauser

## Allegato 4. le specifiche tecniche del misuratore di livello ad ultrasuoni.

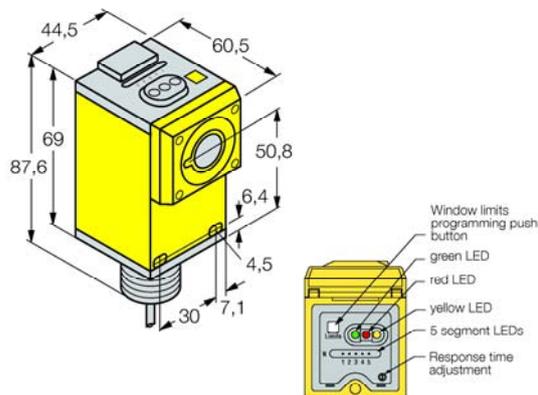


### Remote Ultrasonic Sensors

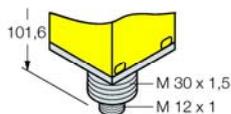


#### Dimensions [mm]

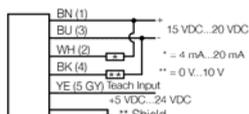
##### ● Cable



##### ● Connector



#### Wiring



\*\* Shield wire should be connected to earth ground or DC common

### Q45UR Series

#### DC-Operation with Analogue Output

<b>Supply voltage <math>U_s</math></b>	15 VDC...24 VDC
Ripple $V_{\infty}$	$\leq 10\%$
No load current	$\leq 100\text{ mA}$
<b>Protection</b>	short-circuit reverse polarity
<b>Output</b>	selectable with DIP-switch
Voltage output	0 VDC...10 VDC
Load current	$\leq 10\text{ mA}$
Supply output	4 mA...20 mA
Load impedance	1 $\Omega$ ...500 $\Omega$
<b>Sensing window</b>	
Range	50 mm...250 mm (Teach-mode setup)
Resolution	0,2%...0,4% of sensing distance dependant on target & response speed setting
Temperature drift	$\pm 0,03\%/^{\circ}\text{C}$ (0 $^{\circ}\text{C}$ ...+50 $^{\circ}\text{C}$ ) $\pm 0,05\%/^{\circ}\text{C}$ (-25 $^{\circ}\text{C}$ ...+70 $^{\circ}\text{C}$ )
Response speed	10 ms...320 ms (adjustable)
<b>Material</b>	
Controller housing	Thermoplastic polyester
Controller transparent cover	Acrylic
Protection class (IEC 60529/EN 60529)	IP67
Temperature range	-25 $^{\circ}\text{C}$ ...+70 $^{\circ}\text{C}$
Cable	2 m, PVC, 5 x 0,34 mm <sup>2</sup>
Connector	Euro-Style 5-pin
<b>Indicator LED's</b>	
Yellow	target within sensing window
Green	power-on
Green flashing	current output overload (open circuit)
Red flashing	target within sensing window (flashing frequency in propor- tion to the received signal strength)
5 segment red LED	target position

#### Accessories

##### Brackets, Controller

SMB30MM	37 849 00	angle bracket
SMB30S	34 706 00	swivel mount bracket
SMB30C	34 701 00	split clamp bracket

##### Connectors

MQDEC2-506	30 608 10	straight type
MQDEC2-506RA	30 608 13	right-angled type

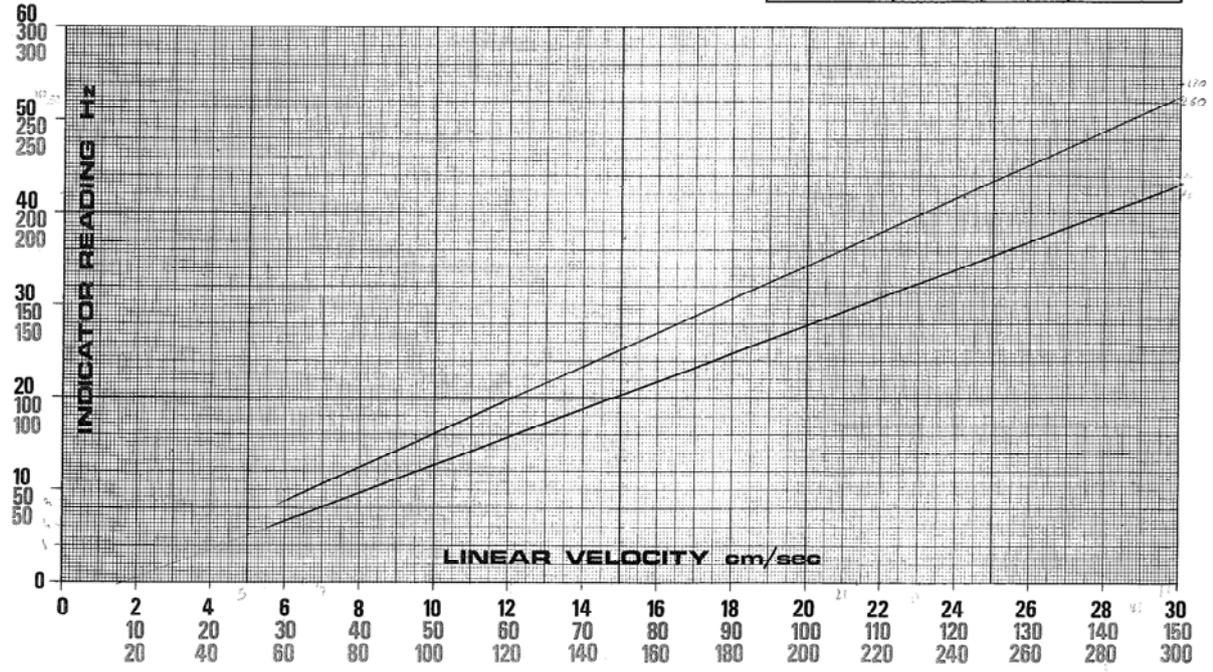
Allegato 5. Curva di taratura fornita dalla ditta Nixon per il misuratore di velocità (micro mulinello, modello "streamflow 400").

Streamflow Probe Calibration Chart *403 Low Speed Probe.*



Use green figures for high speed probes  
Use red and black figures for low speed probes

Serial no *2435* type *403* Date *7/6/05* Engineer *CP*



## Allegato 6. Caratteristiche della cella di carico Alpha Load Beam.

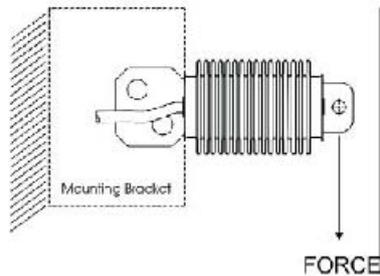
**BLH**

Precision Force and Weight Measurement Technologies

### ALPHA Load Beam Transducers

#### ALPHA Beam Applications:

Bench & Portable Scales  
Low Capacity Batching  
Medical Weighing Systems  
Pull/Tear Strength Testing



- Capacity Range - 5.5, 11, 22, 34, 56, and 112 pounds
- Precision Accuracy and Repeatability
- Environmentally Sealed for Washdown Applications
- Fast, Easy 2 Bolt Installation
- FM and CSA Approved
- OIML Certification for 11 to 112 Pound Capacities



#### Product Description

The ALPHA Beam is a low capacity differential bending beam transducer designed for use in a wide range of medical, industrial, and testing applications. Its unique features are a combination of superb accuracy and performance in a package that is very well sealed against moisture and solvents. ALPHA Beams meet both OIML requirements for accuracy and IP 67 requirements for moisture protection.

Rated force capacities range from approximately 5.5 to 112 pounds (25 to 500 Newtons). Within capacity range, ALPHA Beams measure force bidirectionally, producing an output mV/V signal directly proportional to the force applied.

The heart of the patented ALPHA Beam is the BLH developed SR-4® foil strain gage. Strain Gages are electrically connected to form a balanced Wheatstone Bridge. Compensation resistors maintain the accuracy of the bridge over a wide range of temperatures. The gaged element within the beam metal bellows is environmentally sealed against all adverse conditions, including water immersion.

ALPHA Load Beams are approved by Factory Mutual Research (FM) and the Canadian Standards Association (CSA) for use in Class I, II, and III, Division 1 and 2 hazardous locations. They also are OIML tested and approved in accordance with paragraph 8.1 of the European Standard on Metrological aspects of non-automatic weighing instrument EN 45501:1992 and by application of the OIML International Recommendation R 60 (Edition 1991).

#### BLH Electronics, Inc.

An ISO 9001 Registered Company

Tel: (781) 821-9080

<http://www.blh.com>

Fax: (781) 821-9091