



## Università degli Studi di Napoli Federico II

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE (DICEA)  
Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali

XXVI CICLO

### Indagine sperimentale su manufatti di scarico e derivazione nelle reti di drenaggio urbano

Candidata  
Roberta Padulano

Coordinatore di Dottorato:  
**Chiar. Prof. Arch. E. Petroncelli**

Coordinatore di Indirizzo:  
**Chiar. Prof. Ing. M. Calabrese**

Relatori:  
**Chiar. Prof. Ing. G. Del Giudice**  
**Chiar. Prof. Ing. G. Rasulo**

*Questo qui per lungo tempo ho osservato:  
durante tutta la sua vita lui guardato lontano, al futuro, all'orizzonte! Mai  
la sua mente su dove lui era! Su ciò che faceva! Avventura?! Emozioni?!  
Un Jedi queste cose non ambisce! Tu sei avventato.  
Maestro Yoda  
(Guerre Stellari – L'Impero colpisce ancora, 1980)*

# Sommario

Il presente elaborato prende le mosse dalle attività di ammodernamento della rete fognaria della città di Napoli, nell'ambito della quale si è resa necessaria un'attività sperimentale al fine di determinare i meccanismi di deflusso di due diversi manufatti idraulici.

Il primo manufatto oggetto di interesse è il cosiddetto partitore semi-frontale, una tipologia innovativa di scaricatore di piena poco ingombrante e particolarmente adatto ad essere utilizzato in corrente veloce, costituito da un canale rettangolare posizionato all'interno del canale principale. Le variabili del sistema sono la distanza del fondo del canale derivatore dal fondo del canale principale, ed in particolare il suo rapporto con il tirante della corrente principale, e la larghezza del derivatore, rapportata alla larghezza del canale principale. La sperimentazione, condotta realizzando un modello in similitudine di Froude dell'area di interesse, con un rapporto di scala delle lunghezze pari a 0.15, ha portato alla definizione della scala di deflusso del partitore; tale equazione descrive in sostanza il rapporto di partizione, ovvero il rapporto tra la portata defluente nel derivatore e quella defluente nel canale principale, come coincidente con il rapporto tra le sezioni rispettivamente occupate dalle due correnti. La scala di deflusso, opportunamente espressa in termini adimensionali, costituisce il criterio di progettazione incognito del manufatto; tramite essa è infatti possibile scegliere le dimensioni da assegnare al partitore note che siano le caratteristiche della corrente in arrivo al sistema e il valore della portata da derivare. La sperimentazione ha inoltre consentito di trarre alcune conclusioni circa l'efficienza del partitore, in buona sostanza analoga a quella di simili sistemi di partizione di portata, e riguardo il raggiungimento della condizione di stato critico, che costituisce il limite superiore, in termini di portata, di utilizzo del manufatto.

Il secondo manufatto oggetto di studio è un pozzo di caduta ad asse verticale con imbocco a spigolo vivo. Tale sistema, pur non essendo innovativo nel panorama tecnico internazionale, non risulta tuttavia adeguatamente caratterizzato dal punto di vista progettuale; la letteratura tecnica si limita

infatti a fornire delle considerazioni generiche, per lo più mutuata da studi condotti su pozzi caratterizzati da altri tipi di imbocco. La sperimentazione è stata condotta facendo variare i principali parametri del sistema, quali la lunghezza e il diametro del pozzo; si è inoltre deciso di introdurre un sistema di aerazione consistente in un tubo aeroforo coassiale al pozzo, per il quale si sono impiegati diversi diametri e diversi gradi di affondamento dello stesso all'interno del pozzo. L'analisi ha consentito innanzitutto di definire la peculiare forma della scala di deflusso, costituita da tre diversi segmenti corrispondenti a tre diversi regimi di deflusso che possono realizzarsi all'interno del sistema al variare di portata e tirante. Quindi, i dati sperimentali hanno consentito di individuare una relazione fisicamente basata tra la portata defluente nel pozzo e il carico sulla sezione di imbocco, valida in regime di pressurizzazione e atta ad essere utilizzata come criterio di progettazione del manufatto per tale condizione. Più difficile risulta invece l'interpretazione analitica dei restanti regimi di deflusso, i quali tuttavia sono possibili solo per valori modesti di portata e tirante e risultano, da questo punto di vista, meno gravosi per il manufatto; un'ulteriore complicazione allo studio del fenomeno è dato dalla presenza di fenomeni vorticosi che influiscono sulle condizioni di deflusso all'interno del pozzo, apportando notevoli quantità di aria e variando notevolmente le condizioni interne di pressione.

**Parole chiave:** scaricatore di piena; partitore frontale; corrente veloce; pozzo di caduta; perdite di carico di imbocco; *full flow*; *weir flow*; *transitional flow*.

# Abstract

During the upgrading operations involving the combined sewer system of the city of Naples, two different issues emerged which required a detailed experimental analysis in order to better understand the peculiar flow mechanism.

The first examined issue is a diversion structure whose best hydraulic performance occurs under supercritical conditions, possibly requiring low construction costs and easy installation. The problem has been solved by adopting the so called “frontal rectangular intake diversion structure” (FRIDS), which consists of a rectangular diversion intake located within the approach flow channel. An experimentation has been undertaken by means of a Froude similitude model of the interested area, with a length scale ratio of 0.15, by varying the most influential parameters, such as the distance of the diversion invert from the approach channel bottom, and its ratio to the approach flow depth, and the ratio of the diversion width to the approach channel width. A head-discharge relation has been obtained that describes the diversion rate, namely the ratio of diverted discharge to the approach flow discharge, as equal to the ratio between the related cross sections. Such an equation, conveniently adjusted in a dimensionless form, can be used as a design criterion for the FRIDS, since it allows assigning the diversion dimensions for a fixed value of the diverted discharge, once known the approach flow conditions. Also, the experimental analysis has given basic considerations concerning the diversion efficiency, which has proved to attain values comparable to similar diversion structures, and concerning the critical conditions, which represent the flow rate upper limit for the FRIDS.

The second issue concerns a vertical drop shaft with a square-edged horizontal intake. Although this can't be defined as a novel hydraulic structure, it lacks proper design criteria, as literature just gives basic considerations typically obtained by means of experimental studies of different intake geometries. An experimental analysis has been undertaken by varying the most influential parameters, such as diameter and length of the shaft; also,

a venting system has been adopted which consists of a coaxial vertical pipe, whose influence on the system depends on its diameter and plunging rate. Results of the analysis have allowed the definition of the head-discharge relation, which proves to be made up of three different segments corresponding to three possible different flow regimes. A physically based equation has been obtained that relates the discharge flowing through the drop shaft and the water head over the intake under pressurized flow conditions; such an equation can be adopted as a design criterion for full flow regime. A similar analysis has not been possible for the other flow regimes, given their instability; however, they proved to occur only under low head and discharge values. Also, an additional complication was produced by vortices, which affect flow conditions by causing a large air entrainment and varying the pressure regime along the drop shaft.

**Keywords:** diversion structure; frontal intake; FRIDS; supercritical flow; drop shaft; intake losses; full flow; weir flow; transitional flow.

# Indice

<b>1</b>	<b>Premessa</b>	<b>1</b>
1.1	Struttura della tesi . . . . .	5
<b>I</b>	<b>Il partitore semifrontale</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Introduzione</b>	<b>7</b>
2.1	Classificazione degli scaricatori di piena . . . . .	9
2.1.1	Scaricatori con forte perdita di carico della portata scolmata . . . . .	10
2.1.2	Scaricatori con debole perdita di carico della portata scolmata . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Apparato sperimentale</b>	<b>19</b>
4.1	I principi della similitudine . . . . .	20
4.2	Il modello fisico del partitore . . . . .	22
4.2.1	Il canale a pendenza variabile . . . . .	23
4.2.2	Il modello del collettore e del partitore semifrontale . . . . .	24
4.2.3	Attrezzature . . . . .	27
4.3	Sintesi della sperimentazione . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Analisi dei risultati</b>	<b>34</b>
5.1	Definizione della scala di deflusso . . . . .	37
5.1.1	Analisi dimensionale . . . . .	37
5.1.2	Analisi energetica . . . . .	39
5.1.3	Adimensionalizzazione dei risultati . . . . .	41
5.2	Perdite di carico . . . . .	43
5.3	Profilo di velocità . . . . .	44
5.4	Stato critico . . . . .	45

5.5	Efficienza del partitore . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>52</b>
<b>II</b>	<b>Il pozzo di caduta</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>Introduzione</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>62</b>
8.1	Sintesi delle ricerche effettuate . . . . .	74
<b>9</b>	<b>Apparato sperimentale</b>	<b>75</b>
9.1	Attrezzature . . . . .	77
9.2	Sintesi delle prove . . . . .	84
<b>10</b>	<b>Analisi dei dati</b>	<b>89</b>
10.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	91
10.2	Configurazioni dotate di aeroforo . . . . .	93
10.3	Sintesi delle osservazioni . . . . .	103
10.4	<i>Borda free flow</i> . . . . .	103
10.5	Pressioni . . . . .	107
10.5.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	107
10.5.2	Configurazioni dotate di aeroforo . . . . .	110
10.6	Misure dinamiche del tirante idrico . . . . .	113
10.7	Misura della portata d'aria . . . . .	114
10.8	Elementi di vorticit� . . . . .	116
<b>11</b>	<b>Elaborazione dei dati</b>	<b>121</b>
11.1	Analisi dimensionale . . . . .	121
11.1.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	123
11.1.2	Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	124
11.1.3	Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	125
11.2	Approccio energetico . . . . .	125
11.2.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	129
11.2.2	Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	131
11.2.3	Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	133
11.3	Coefficiente di portata . . . . .	135
11.3.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	135
11.3.2	Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	137
11.3.3	Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	137
11.4	Unificazione dei risultati . . . . .	142
11.4.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	142
11.4.2	Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	142

11.4.3	Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	144
11.5	Regime di <i>non full flow</i> . . . . .	144
11.5.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	145
11.5.2	Configurazioni dotate di aeroforo . . . . .	145
11.6	Adimensionalizzazione delle pressioni . . . . .	149
11.7	Richiesta d'aria . . . . .	153
11.8	Analisi del <i>Borda free flow</i> . . . . .	153
11.9	Considerazioni finali . . . . .	154
11.9.1	Configurazioni prive di aeroforo . . . . .	155
11.9.2	Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	156
11.9.3	Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	157
<b>12</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>160</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>163</b>
	<b>Appendice A</b>	<b>167</b>
	<b>Appendice B</b>	<b>171</b>
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>194</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>203</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>205</b>

# Capitolo 1

## Premessa

Anche per la sozzura dell'anima  
c'è bisogno di canali di scolo e di  
pure acque detergenti che entro  
vi scorrono.

---

Friedrich Nietzsche  
(*La gaia scienza*, 1882)

Il presente elaborato prende le mosse dall'attività di ammodernamento di un tratto della rete fognaria della città di Napoli, ed in particolare il bacino fognario afferente alla Nuova Collettrice di via T. Tasso.

Nel corso degli anni, sono stati proposti e valutati senza alcun esito diversi progetti di risanamento: gli interventi presentano in effetti delle difficoltà dovute alle condizioni supercritiche della corrente che defluisce nei collettori e all'estrema variabilità altimetrica, che rendono poco efficaci le opere d'arte usualmente impiegate in fognatura. Nello specifico, l'insieme di interventi previsti ha come fine l'entrata in funzione della cosiddetta Nuova Collettrice, manufatto attualmente già esistente ma privo degli adeguati collegamenti con i collettori secondari. Nelle ipotetiche future condizioni di esercizio essa dovrebbe drenare una portata, con riferimento ad uno specifico tempo di ritorno, non compatibile con la capacità di alcuni manufatti posti a valle della Nuova Collettrice, ed in particolare con un pozzo a vortice posto in prossimità della sezione di chiusura della rete. Il primo ostacolo alla messa in funzione del nuovo sistema di drenaggio è dunque costituito dalla necessità di operare una partizione della portata, deviando l'aliquota in eccesso rispetto ai manufatti di valle; si sono quindi individuati due possibili collettori secondari in cui allontanare la portata scaricata. La seconda difficoltà si è riscontrata appunto nell'utilizzare uno dei due collettori precedentemente individuati, il quale presenta, lungo il suo percorso, un salto di alcuni metri

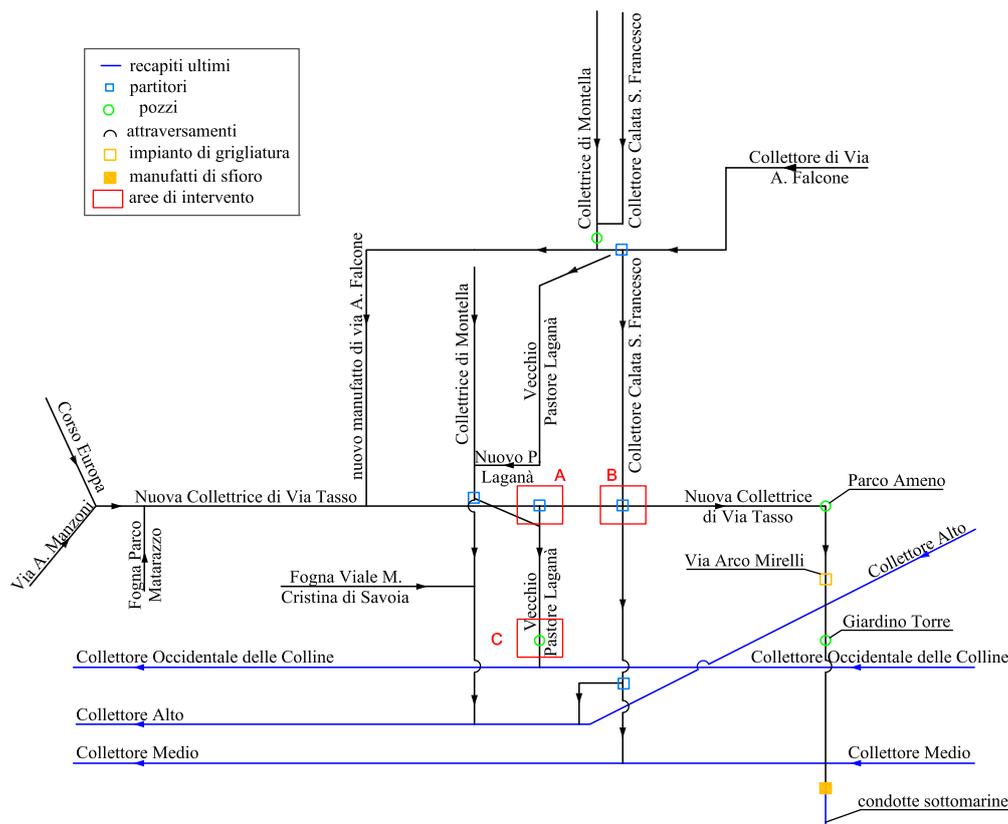


Figura 1.1: Schema di funzionamento del bacino fognario gravante su via Tasso a seguito degli interventi.

all'interno di un pozzo verticale, al fine di superare un notevole dislivello altimetrico.

In Fig. 1.1 è mostrato lo schema di funzionamento della rete successivo alla realizzazione degli interventi previsti; si nota in particolare che si ipotizza di recapitare nella Nuova Collettrice di via Tasso l'intera portata addotta dalle collettrici di Montella, Aniello Falcone (a monte e a valle dell'incrocio via Aniello Falcone-Calata San Francesco), Calata San Francesco nonché le portate complessive recapitate nella vecchia collettrice di via Tasso, così che il nuovo manufatto si troverebbe a drenare un bacino di circa 68 ha, da cui deriverebbe la portata al colmo di piena, con periodo di ritorno di 30 anni, pari a  $18.3 \text{ m}^3/\text{s}$ . Stanti i parametri geometrici del manufatto, essa defluirebbe nella Nuova Collettrice di via Tasso con le caratteristiche idrauliche indicate in Tab. 1.1.

Il percorso lungo la rete di drenaggio della portata defluente nella Nuova Collettrice di Via Tasso prevede il passaggio attraverso un pozzo a vortice del diametro di 3.6 m e altezza di circa 35 m; la verifica di compatibilità delle condizioni di deflusso previste in Tab. 1.1 con il pozzo ha dato però

Tabella 1.1: Caratteristiche idrauliche della corrente prevista nella Nuova Collettrice di via Tasso ad interventi ultimati.

portata drenata $Q_0$	18.3 m <sup>3</sup> /s
tirante di moto uniforme $h_u$	0.92 m
tirante di stato critico $h_c$	1.98 m
velocità $V_0$	9.4 m/s
numero di Froude $F_0$	3.14

esito negativo: è risultato infatti che il pozzo a vortice in questione non è in grado di convogliare una portata superiore a 13.5 m<sup>3</sup>/s. Ciò rende necessaria l'individuazione, lungo la Nuova Collettrice, a monte dell'impianto di grigliatura, di nodi in cui ubicare dei manufatti di partizione per sfiorare le portate in eccesso, nell'ordine dei 5 m<sup>3</sup>/s. Tali nodi sono stati individuati nei punti di intersezione tra la Nuova Collettrice di Via Tasso e, rispettivamente da monte verso valle, il Collettore Pastore Laganà ed il Collettore Calata San Francesco (aree di intervento "A" ed "B" in Fig. 1.1). Entrambi i collettori, deputati ad essere canali di derivazione per lo scarico della collettrice principale, hanno quote del fondo di poco superiori a quella della Nuova Collettrice di via Tasso.

Le caratteristiche delle succitate intersezioni non rendono conveniente la scelta degli scaricatori usuali come manufatti di partizione: infatti, sia il collettore Pastore Laganà che il Calata S. Francesco presentano quote di fondo del tutto confrontabili con quelle della Nuova Collettrice, il che non rende fattibile l'uso di scaricatori a salto (per i quali il collettore ricevente deve essere necessariamente posto a quota inferiore del fondo del canale principale), mentre le caratteristiche di ipercriticità attese nella corrente in esame rendono poco efficaci gli sfioratori laterali. Infine, si noti che la Nuova Collettrice di Via Tasso è realizzata mediante una doppia palificata, per cui l'adozione di sfioratori laterali in destra idraulica comporterebbe il taglio di un numero considerevole di pali con tutte le complicazioni ed implicazioni di tipo strutturale che ne conseguono. Per evitare ciò, o quanto meno per ridurre il numero dei pali interessati dal manufatto, si intende progettare e realizzare una tipologia di scaricatori di piena cosiddetti "semi-frontali", costituiti da un setto orizzontale e uno verticale che individuano, all'interno di uno speco rettangolare, una sezione anch'essa rettangolare, con una delle pareti verticali in comune con lo speco principale e la base ad una determinata altezza dal fondo, come illustrato in Fig. 1.2(a). L'aliquota della portata convogliata all'interno del manufatto deve essere successivamente deviata verso il derivatore, mentre la restante aliquota che permane nello speco originario deve proseguire il suo percorso verso valle. In definitiva, il sistema di funzionamento auspicato è il seguente:

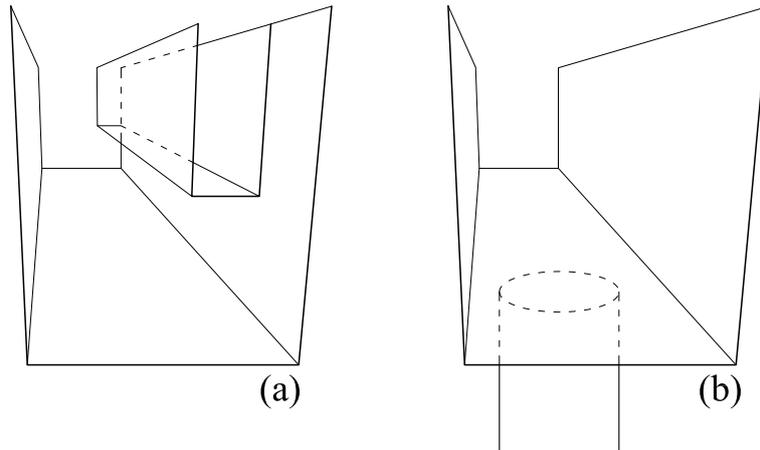


Figura 1.2: Schema di funzionamento del manufatto di partizione (a) e di quello di scarico (b).

- per portate in arrivo nella Nuova Collettrice di via Tasso minori o uguali a  $13.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , l'intera portata deve permanere nel collettore stesso transitando quindi al di sotto dei setti orizzontali dei due partitori semi-frontali;
- per portate in arrivo nella Nuova Collettrice di via Tasso fino a  $18.3 \text{ m}^3/\text{s}$  (corrispondente alla massima portata trentennale che può giungere da monte nel collettore) i due partitori devono derivare complessivamente una portata pari a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Questa può essere anche non equamente ripartita tra i due manufatti di partizione, attesa la diversa geometria dei punti di intersezione con il Collettore Pastore Laganà e il Collettore Calata S. Francesco.

Nella letteratura non esistono adeguati studi sperimentali che indaghino il comportamento di manufatti di questo tipo: non risulta, quindi, possibile pervenire a indicazioni di tipo progettuale. Per dimensionare correttamente il manufatto in progetto, occorre necessariamente effettuare delle prove sperimentali su modello fisico.

Risolto il problema della partizione, un'ulteriore difficoltà è apportata dalla presenza all'interno del collettore Pastore Laganà di un manufatto di caduta verticale lungo circa 20 m e di diametro di circa 1 m, schematizzato in come illustrato in Fig. 1.2(b), ubicato poco a valle dell'intersezione con la Nuova Collettrice (area di intervento "C" in Fig. 1.1). Tale manufatto non presenta una configurazione particolarmente innovativa; tuttavia, la letteratura tecnica non fornisce adeguate indicazioni progettuali. Si è pertanto effettuato uno studio volto alla definizione del comportamento idraulico di un manufatto simile, riprodotto in laboratorio senza alcun vincolo modellistico.

## 1.1 Struttura della tesi

Definiti i due ambiti di interesse, riguardanti la definizione del comportamento idraulico e dei criteri di progettazione rispettivamente per un partitore semi-frontale di portata e per un manufatto di caduta ad asse verticale, il presente lavoro si suddivide in due parti corrispondenti a tali argomenti. Per ognuna delle due parti si succederanno:

1. l'introduzione, nella quale verrà presentata nella sua generalità la categoria di manufatti alla quale l'opera in esame afferisce;
2. lo stato dell'arte, in cui verranno presentati i risultati che la letteratura tecnica attualmente offre, con particolare attenzione ai lavori sperimentali su cui ci si è basati per l'elaborazione delle analisi;
3. la descrizione dell'apparato sperimentale, con particolare attenzione agli strumenti di misura adoperati e ai criteri di similitudine adottati, se presenti;
4. la descrizione dei risultati e la loro analisi numerica, eventualmente differenziata per tipologie di dati. In questa fase verranno forniti gli strumenti utili alla progettazione della specifica tipologia di manufatto;
5. le conclusioni.

# Parte I

## Il partitore semifrontale

# Capitolo 2

## Introduzione

Tragedia è se ti tagli le dita...  
Commedia è se camminando  
cadi in una fogna aperta e  
muori.

---

Mel Brooks

Nei sistemi fognari cosiddetti “misti” la portata nera e quella pluviale defluiscono insieme negli stessi collettori, che sono dunque dimensionati per una portata che è tipicamente di alcuni ordini di grandezza superiore alla portata nera. La portata nera è di norma fortemente ricca di inquinanti e deve pertanto essere trattata in opportuni impianti di depurazione; in occasione di eventi di pioggia, però, il significativo aumento della portata fa sì che il grado di diluizione globale sia compatibile con uno scarico diretto in un ricettore, eventualmente previa trattamenti di sgrossatura meno spinti rispetto a quelli previsti per la portata nera (Cozzo, 1979; Biggiero, 1969). Inoltre, un corretto funzionamento degli impianti di depurazione non è normalmente raggiunto in presenza di portate in arrivo molto più elevate della corrispondente portata di dimensionamento, che è in genere pari alla portata media nera. I manufatti che assolvono al compito di smaltire le acque che superano determinati valori di portata, ritenute perciò sufficientemente diluite, sono detti “scolmatori” o “scaricatori di piena” (Ippolito, 1995).

Più in generale, oltre al caso tipico dell’impianto di depurazione, che costituisce l’estremo di valle di una rete fognaria, all’interno del sistema di drenaggio possono esistere svariati manufatti il cui corretto funzionamento è inficiato dall’aumento di portata in seguito a eventi meteorici, come è possibile che, a seguito di interventi di riparazione o ammodernamento delle reti, alcuni collettori si trovino a convogliare una portata di piena superiore al valore in base al quale erano stati progettati. In questi casi, gli scaricatori di piena, più semplicemente definiti *partitori*, possono essere adoperati per

operare una partizione della portata in occasione di eventi di pioggia, alleggerendo il sistema di collettori a valle della separazione e convogliando la portata scaricata verso rami fognari più idonei.

La grande attenzione prestata agli scaricatori di piena nella letteratura tecnica riguarda soprattutto il loro utilizzo ai fini della diluizione del fluido scaricato; in tal senso, essi vanno a separare dalla portata complessiva defluente nel collettore l'aliquota nera da quella di pioggia. Detta  $Q$  la portata in arrivo al manufatto, lo scaricatore garantisce dunque l'arrivo all'impianto dell'intero valore di  $Q$  fintanto che questo non superi il valore massimo ammissibile  $Q_d = d \cdot Q_n$ , essendo  $Q_n$  la portata nera e  $d$  il grado di diluizione minimo richiesto per lo scarico diretto. Se  $Q > Q_d$ , allora la portata in eccesso sarà allontanata in quanto ritenuta sufficientemente diluita, mentre all'impianto di depurazione, qualunque sia il valore di  $Q$ , purché maggiore di  $Q_d$ , arriverà sempre una portata pari a  $Q_d$  o di poco superiore. Tuttavia, nella pratica, la portata  $Q_d$  aumenta con  $Q$  in maniera spesso non trascurabile; si definisce dunque "efficienza dello scaricatore" il rapporto tra la portata  $Q_{d,max}$  derivata in occasione di un generico evento di pioggia e la portata derivata  $Q_{d,p}$  di progetto:

$$\eta = \frac{Q_{d,max}}{Q_{d,p}} \quad (2.1)$$

e il suo valore è pari a 1 per uno scaricatore ideale, per il quale al variare della portata in ingresso  $Q$ , purché maggiore di  $Q_d$ , la portata derivata resta costantemente pari a  $Q_{d,p}$ , valore di dimensionamento dei manufatti a valle della partizione; nei partitori reali, invece, l'efficienza è un numero superiore all'unità. Il rapporto di scolmamento si definisce invece come:

$$R = \frac{Q - Q_d}{Q} \quad (2.2)$$

e dovrebbe essere molto alto (Biggiero (1969) e Cozzo (1979) suggeriscono un valore pari al 95% con riferimento ad un'area abitata esemplificativa).

È da precisare che molto spesso, soprattutto nel caso di eventi di pioggia di grande intensità, la prima parte della portata pluviale, detta "acqua di prima pioggia", è fortemente inquinata sia perché raccoglie il risultato del dilavamento delle strade, sia perché mette in movimento il materiale sedimentato in fognatura nel periodo asciutto. Il concetto di rapporto di diluizione può essere quindi fuorviante: quello che si cerca di ottenere con gli scolmatori non è tanto la diluizione spinta della portata così che questa possa essere sversata liberamente in un ricettore, quanto la riduzione della portata in arrivo all'impianto di depurazione. Per ridurre la frequenza degli sversamenti diretti e il quantitativo complessivo degli inquinanti immessi senza trattamento nel ricettore, sarebbe necessario fissare un valore alto della portata  $Q_d$ . Purtroppo, per quanto detto, l'efficienza del depuratore si

riduce drasticamente quando riceve carichi idraulici molto superiori a quelli di dimensionamento; e d'altra parte, dimensionare l'impianto per le elevatissime portate che si possono verificare in tempo di pioggia risulterebbe non solo oneroso, ma anche controproducente, perché l'impianto non funzionerebbe correttamente in condizioni di tempo asciutto. Perciò la scelta della portata  $Q_d$ , e quindi del grado di diluizione, è un'operazione molto delicata, che coinvolge anche la progettazione dell'impianto di depurazione. In altre parole, data la complessità nella scelta di  $d$ , la separazione della portata operata dallo scaricatore è di tipo principalmente "quantitativo" piuttosto che "qualitativo". In tal senso, le grandezze definite sulla base del concetto di diluizione sono valide più in generale anche per i semplici partitori, posta  $Q_d$  la portata di dimensionamento del manufatto, ed essendo dunque  $Q_d$  e  $Q - Q_d$  le due aliquote della corrente che si intende separare.

Fatta questa doverosa precisazione, appare utile andare a descrivere sommariamente lo schema funzionale e le caratteristiche basilari degli scaricatori attualmente in uso nelle reti di drenaggio urbano.

Lo schema tipico di uno scaricatore consta di tre elementi:

- l'*immissario* è il canale fognario che porta al manufatto;
- il *derivatore* è il collettore in cui si incanala una portata di valore minore o al massimo uguale a  $Q_d$ ;
- l'*emissario* è il canale che allontana la portata scaricata.

A seconda della posizione reciproca e dell'interazione tra i tre elementi si ottengono diversi schemi di scaricatore, soggetti a diverse problematiche e contraddistinti da diversi livelli di efficienza a seconda delle condizioni di deflusso in cui si trovano ad operare. Si noti che la fallanza di questi manufatti non è solo imputabile ad una errata scelta dello schema funzionale nella particolare situazione di progetto, ma anche e soprattutto alla mancanza di un adeguato piano di manutenzione e all'incapacità di riconoscere il singolo manufatto come parte di una più ampia e complessa rete di drenaggio (American Public Works Association, 1970).

## 2.1 Classificazione degli scaricatori di piena

Nel seguito vengono elencati i più comuni tipi di scaricatore di piena secondo una classificazione effettuata in base alle perdite di carico subite dalle due aliquote in cui la corrente principale viene separata:

1. Scaricatori con forte perdita di carico della portata scolmata;
2. Scaricatori con debole perdita di carico della portata scolmata.

Tale classificazione è in sostanza equivalente a quella che distingue tra manufatti che deviano la portata in eccesso nell'emissario e manufatti che deviano nel derivatore l'aliquota minore della partizione.

Alla prima categoria appartengono gli sfioratori laterali e frontali, mentre alla seconda categoria appartengono gli scaricatori a luce di fondo o frontale. Tipicamente, il primo gruppo è preferibile quando all'interno della rete non si hanno sensibili dislivelli; in caso contrario, si mostrano invece più utili gli scaricatori del secondo tipo, e soprattutto quando la corrente in arrivo ha un'elevata energia cinetica, per cui è preferibile che essa defluisca senza incontrare ostacoli.

### 2.1.1 Scaricatori con forte perdita di carico della portata scolmata

Questi tipi di manufatti sono costituiti da soglie di sfioro la cui altezza è tipicamente pari all'altezza di moto uniforme della massima portata ammissibile nel canale derivatore, cioè la portata  $Q_d$ ; di conseguenza, lo sfioro inizia quando il tirante nell'immissario supera l'altezza della soglia, e la perdita di carico della corrente scolmata è almeno pari all'altezza della soglia. Per un corretto funzionamento dello sfioratore, è opportuno che il carico all'imbocco del derivatore non aumenti troppo all'aumentare della portata defluente nell'immissario, per far sì che, anche quando è in arrivo una portata di pioggia di valore molto elevato, nel derivatore defluisca una portata pari a  $Q_d$  o lievemente superiore. Affinché ciò accada è in genere previsto un sistema di strozzamento all'imbocco del derivatore.

Nello **sfioratore laterale** una porzione dell'immissario, detta *canale sfioratore*, presenta una parete ribassata, attraverso la quale, in occasione di eventi meteorici, la portata sfiora in un canale adiacente detto *canale di gronda* e quindi nell'emissario; la restante aliquota, o l'intera portata in tempi asciutti, prosegue indisturbata verso il canale derivatore, che, come per lo sfioratore frontale, può essere libero o controllato da un dispositivo di strozzamento, come una luce a battente o un venturimetro per canali (Fig. 2.1). Il secondo è preferibile poiché meno soggetto del battente a problemi di ostruzione dovuti al materiale trasportato. La progettazione e il funzionamento di uno sfioratore laterale dipendono dalle caratteristiche di pendenza dei canali interagenti; in genere, è preferibile avere una corrente lenta in arrivo al manufatto, poiché in caso contrario potrebbero formarsi risalti idraulici lungo la soglia sfiorante (Hager, 2010); l'utilizzo di un manufatto di controllo all'imbocco del derivatore è funzionale anche a questo scopo. Inoltre la soglia potrebbe risultare troppo lunga in fase di progettazione per un valore della portata da sfiorare troppo alto (American Public Works Association, 1970).

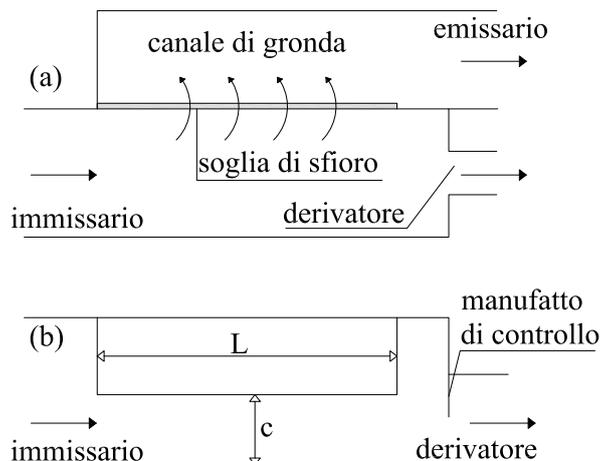


Figura 2.1: Schema di funzionamento dello sfioratore laterale: pianta (a) e profilo (b).

Gli **sfioratori frontali** sono invece costituiti da una soglia sfiorante disposta trasversalmente alla corrente, mentre il canale derivatore è posto in fregio all'immissario immediatamente a monte della soglia (Fig. 2.2). Il derivatore può essere regolato da una luce a battente, ottenuta mediante una paratia, o da un venturimetro per canali; in ogni caso, è forte il rischio che il materiale galleggiante venga trascinato nell'emissario o, peggio, vada ad ostruire l'ingresso al derivatore. Inoltre, date le modeste dimensioni della soglia, pari al massimo alla larghezza dello speco, l'efficienza di questo sistema non è mai alta, variando molto il carico al variare della portata sfiorata. Per questi motivi, lo sfioratore frontale è impiegato solo di rado, qualora le circostanze impongano di effettuare un semplice alleggerimento del collettore di valle con un'opera economica, di semplice realizzazione e poco ingombrante.

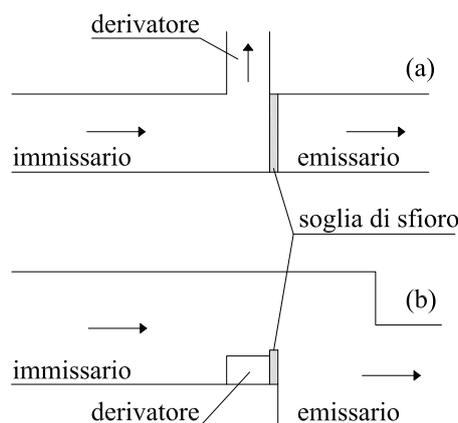


Figura 2.2: Schema di funzionamento dello sfioratore frontale: pianta (a) e profilo (b).

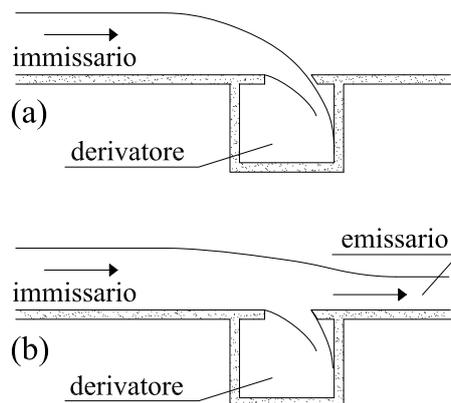


Figura 2.3: Funzionamento dello scaricatore a salto per  $Q=Q_d$  (a) e per  $Q > Q_d$  (b).

### 2.1.2 Scaricatori con debole perdita di carico della portata scolmata

I manufatti di questo tipo sono costituiti da una luce, posta sul fondo dell'immissario o in prossimità di esso, attraverso la quale una portata minore o al più uguale a  $Q_d$  viene trasferita a un canale derivatore posto a quota inferiore rispetto all'immissario. In occasione di eventi di pioggia, la maggiore aliquota di portata prosegue pressoché indisturbata nell'emissario, subendo una trascurabile perdita di carico, mentre, a differenza degli sfioratori, è la portata derivata ad essere allontanata dall'immissario, dopo aver subito una significativa perdita di carico.

Negli **scaricatori a luce di fondo** (o “a salto”) la luce è appunto posta sul fondo del canale, cosicché la portata da derivare perviene al canale inferiore tramite un getto il cui profilo dipende dalla velocità della corrente in arrivo (Biggiero, 1969). All'aumentare della portata aumenta anche la velocità, in particolare in prossimità del fondo, e il getto si allunga sempre più fino a impattare contro il fondo dell'emissario; all'ulteriore aumentare della portata, l'impatto è tale che parte della corrente perviene al derivatore e parte defluisce nell'emissario. Ne consegue che, pur crescendo notevolmente con la portata in arrivo il carico sulla luce, la portata derivata non aumenta di molto poiché la sezione di efflusso si riduce, in particolar modo nelle correnti veloci (Ippolito, 1995); questo è dunque l'ambito di applicazione in cui tale manufatto si dimostra più efficace. A seconda del profilo di imbocco del derivatore si distinguono scaricatori “a fondo allineato”, scaricatori “a salto brusco” e scaricatori “con scivolo di raccordo”.

Negli **scaricatori a luce frontale**, in Fig. 2.4, la luce è ottenuta mediante un setto orizzontale parallelo al fondo dell'immissario; fino a quando la portata in arrivo è minore o uguale a  $Q_d$  essa imbocca la luce inferiore, che

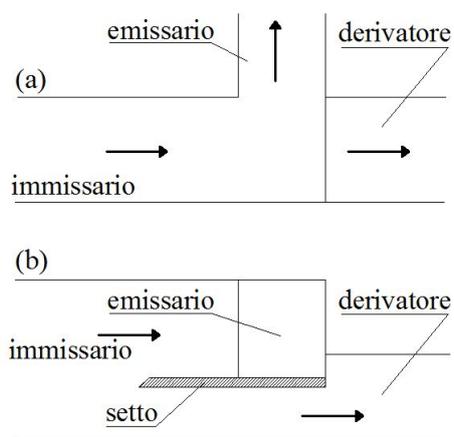


Figura 2.4: Schema di funzionamento dello scaricatore a luce frontale: pianta (s) e profilo(b).

porta al canale derivatore, mentre superato tale valore parte della corrente imbocca la restante porzione della sezione, venendo quindi convogliata nell'emissario. All'aumentare della portata in arrivo aumenta la velocità della corrente e dunque anche la portata derivata; per massimizzare l'efficienza del manufatto (ossia per fare in modo che all'aumentare della portata in arrivo quella derivata sia al più uguale a  $Q_d$ ) occorre che la portata derivata perda il maggior carico possibile, in modo da risentire meno delle variazioni del carico a monte.

# Capitolo 3

## Stato dell'arte

La maggior parte di noi vive  
sguazzando nelle fogne, solo che  
alcuni lo fanno guardando le  
stelle.

---

Oscar Wilde

La configurazione scelta per il partitore, sommariamente descritta nella Premessa, non ha precedenti nella letteratura tecnica; pertanto, ci si è affidati in buona sostanza a studi e considerazioni riguardanti modelli simili, ed in particolare allo schema di partitore frontale, il cui elemento fondamentale è un setto orizzontale che divide il canale in una parte superiore e una inferiore per la sua intera larghezza (Fig. 2.4).

Anche per tale configurazione i riferimenti bibliografici sono scarsi; si tratta in particolare di quattro studi effettuati da Cozzo (1979, 1986), Citrini (1982) e Mutti e Paoletti (2006). Essi analizzano, sperimentalmente e teoricamente, tutte le possibili condizioni di funzionamento del manufatto (corrente in arrivo lenta o veloce, vena nell'alveo inferiore ben aerata o aderente all'intradosso, presenza o meno di un rigurgito da valle nell'alveo superiore) e gli effetti dei parametri progettuali (altezza del setto dal fondo, spessore del setto, forma della testa del setto) sulla ripartizione della portata nei due alvei e sul comportamento idrodinamico della corrente.

Nel suo primo studio sperimentale, Cozzo (1979) considera un canale a sezione rettangolare di dimensioni  $15 \times 35$  cm e lungo 8 m, in cui, ad una certa distanza dall'imbocco, è posizionato un setto orizzontale intercambiabile, la cui distanza dal fondo del canale è facilmente variabile. La corrente defluente al di sotto del setto (cioè nel derivatore) e quella defluente al di sopra (cioè nell'emissario) pervengono a due diverse vasche di calma provviste di misuratore a risalto per la misura della portata.

Le prove effettuate riguardano sia le correnti lente che quelle veloci (la pendenza assegnata al canale è dello 0.12%, e solo in alcuni casi dell'1%); in entrambi i casi, l'autore afferma che *“la corrente inferiore in prossimità dell'imbocco deve necessariamente essere in depressione; infatti, subito a valle del setto, si deve avere la formazione di una sezione contratta per effetto della deviazione che subiscono i filetti superiori: ciò induce a ritenere che, analogamente al caso dell'efflusso da una luce con tubo addizionale esterno, la portata  $q$  in condizioni di vena aderente all'intradosso del setto risulti superiore a quella che si avrebbe in condizioni di vena aerata”*. Tale affermazione è confermata dall'evidenza sperimentale, poiché l'introduzione di un tubicino di gomma a contatto con l'atmosfera determina un forte richiamo di aria e il successivo distacco della corrente derivata dalla parete inferiore del setto, fintanto che l'apporto di aria è garantito. Poiché inoltre la portata derivata in condizioni di vena aderente è maggiore di quella che si avrebbe in condizioni di vena aerata, per garantire una maggiore efficienza del partitore (ovvero per non derivare una portata di troppo superiore a  $Q_d$ ) appare conveniente garantire l'aerazione della corrente inferiore tramite un sistema di canne di ventilazione. Un'adeguata ventilazione previene anche la formazione di vortici, che, apportando aria alla corrente derivata in maniera discontinua, determinano un funzionamento pulsante del sistema. L'Autore sperimenta inoltre diversi tipi di setti, di vario spessore e caratterizzati da una diversa sagomatura del fronte, concludendo che il migliore, dal punto di vista dell'efficienza del partitore, risulta quello che presenta uno spigolo vivo rivolto verso il basso, che garantisce un efficace distacco della corrente inferiore arrecando contemporaneamente il minore disturbo possibile alla corrente superiore, come illustrato in Fig. 3.1(a).

L'analisi dei dati sperimentali si concentra dapprima sullo studio dei coefficienti di contrazione, ricavati applicando il teorema di Bernoulli tra l'ultima sezione di moto gradualmente variato a monte del setto e la prima del canale derivatore, avendo posto pari a 1 il coefficiente di ragguglio delle velocità:

$$H = C \cdot a + \frac{Q_d^2}{2g(Ca \cdot B)^2} \quad (3.1)$$

dove  $a$  è la distanza del setto orizzontale dal fondo,  $B$  è la larghezza di entrambi i canali,  $C$  è il coefficiente di contrazione e  $H$  è il carico totale della corrente in arrivo con un tirante  $h$ . Dall'Eq. (3.1) si ricava:

$$Q_d = C \cdot aB \sqrt{2g \cdot (H - Ca)} \quad (3.2)$$

che, in analogia con l'efflusso sotto una paratoia, può essere riscritta in una forma più compatta:

$$Q_d = \mu \cdot aB \sqrt{2gH} \quad (3.3)$$

dove  $\mu$  è il coefficiente di efflusso, che come  $C$  presenta una significativa proporzionalità con il rapporto  $h/a$ . In particolare, con riferimento alle prove

effettuate con due setti di diverso spessore, ma entrambi del tipo a spigolo vivo,  $\mu$  risulta direttamente proporzionale ad  $h/a$  per tutti i valori sperimentati di  $a$ . Per ognuno dei due setti, per alti valori di  $h/a$  il coefficiente di efflusso si assesta ad un valore costante, pari a 0.7 per il setto sottile, e 0.65 per il setto più spesso: l'aumento di spessore si traduce dunque in un aumento dell'angolo di deviazione dei filetti fluidi e quindi della contrazione. Lo stesso effetto non è chiaramente visibile sui coefficienti di contrazione:  $C$  risulta infatti inversamente proporzionale a  $h/a$  per il setto sottile, ma direttamente proporzionale per il setto spesso, cosa che contrasta anche con le osservazioni visive. Ciò è imputabile, secondo l'Autore, al fatto che in questo caso potrebbe non essere corretto porre  $C_v = 1$ . L'effetto dello spessore non è invece così marcato per altri tipi di setto, ad esempio quelli con lo spigolo vivo in alto: in questo caso, il coefficiente di efflusso risulta sempre molto più alto dei valori illustrati in precedenza, per qualunque spessore sperimentato.

Viene inoltre data una relazione sperimentale della legge di ripartizione delle portate:

$$\frac{Q_d}{Q} = m \cdot \left( \frac{Q}{Ba\sqrt{ga}} \right)^{-n} \quad (3.4)$$

dove  $m$  e  $n$  sono parametri ricavati empiricamente e forniti dall'Autore; essi risultano dipendenti dalla pendenza del canale e dalla forma del setto, ma sono pressoché indipendenti dallo spessore del setto orizzontale. Per quanto riguarda infine l'efficienza del manufatto, dall'analisi dei dati sperimentali si ottengono valori compresi tra 2.45 e 3.85 per le correnti lente e pari a 2.2 per le correnti veloci; tali valori sono del tutto confrontabili, se non migliori, rispetto ai valori forniti da Biggiero (1969) per gli scaricatori a salto con fondo allineato, dell'ordine di 4-5.

In Cozzo (1986), l'Autore si concentra maggiormente sulle equazioni che regolano il comportamento di un derivatore frontale, basandosi sull'ipotesi, già citata nell'introduzione, di perdite di carico di ingresso nel manufatto trascurabili. Viene messo a punto un modello matematico in termini adimensionali, valido in qualsiasi condizione di deflusso della corrente in arrivo (veloce o lenta) e della vena inferiore (aderente o distaccata). Un'analisi di sensitività dei parametri mostra che il fattore da cui dipende maggiormente l'efficienza  $Q_i/Q_d$  (essendo  $Q_i$  la generica portata defluente nel derivatore e  $Q_d$  il suo valore di progetto) è il numero di Froude della portata di dimensionamento  $Q_d$ ; in particolare, a parità del rapporto  $Q/Q_d$  l'efficienza risulta tanto minore (si ricorda che in uno scaricatore ideale l'efficienza è pari a 1) quanto più è veloce la corrente nel derivatore.

Tali considerazioni sono convalidate da una nuova campagna sperimentale, con un'installazione simile a quella precedente (Cozzo, 1979) ma con un canale di sezione circolare con diametro interno pari a 291 mm, lunghezza a monte del setto di circa 8 m, un setto orizzontale di spessore pari a

1 cm con spigolo vivo rivolto verso il basso e un sistema di aerazione della vena inferiore. Le pendenze assegnate al canale variano tra lo 0.1% e il 3%. Le nuove prove sperimentali sono impiegate in particolar modo per determinare il legame tra il coefficiente di contrazione  $C$  e il numero di Froude della corrente in ingresso al sistema: sebbene la dipendenza tra i due sia molto stretta, essa assume analiticamente una forma diversa al variare della distanza del setto dal fondo e delle caratteristiche cinematiche della corrente, pertanto risulta impossibile per l'Autore fornirne una forma unificata. Ancora una volta l'analisi dei dati sperimentali fornisce valori di efficienza del tutto confrontabili e anche più soddisfacenti rispetto a quelli tipici degli scaricatori a salto.

Nel lavoro di Citrini (1982), l'Autore, sulla base delle evidenze sperimentali contenute in Cozzo (1979, 1986), affronta uno studio analitico del fenomeno della partizione, con riferimento allo schema di derivatore frontale. L'analisi è condotta rigorosamente nel caso di vena aerata nel ramo inferiore, cosicché sia possibile definire un coefficiente di contrazione  $C$ , per varie combinazioni delle caratteristiche cinematiche delle correnti defluenti nei diversi alvei (corrente in arrivo veloce o lenta, alveo superiore a debole o forte pendenza). L'Autore conclude che *“escluso il caso di corrente veloce con energia sufficiente, che ovviamente non viene perturbata dalla presenza del derivatore, il problema di determinare la ripartizione delle portate resta lo stesso, sia che il numero di Froude sia insufficiente oppure esuberante: si stabilirà, in corrispondenza della sezione di diramazione, proprio l'energia minima necessaria per avviare le due correnti derivate*. Sono inoltre fornite alcune considerazioni di massima per il caso in cui il ramo inferiore aderisca all'intradosso del setto orizzontale. Tale situazione è analiticamente più complessa in quanto il parametro che governa la ripartizione della portata non è più il coefficiente di contrazione bensì la quota piezometrica subito a valle dell'imbocco, che non è nota a priori ma dipende dalle condizioni di valle, ed in particolare proprio dalla incognita portata derivata. Le equazioni che regolano il fenomeno non sono dunque più risolvibili per via analitica, ma solo tramite successive approssimazioni.

Considerazioni tecniche relative al caso in cui la corrente inferiore defluisca in regime di pressurizzazione sono fornite da Mutti e Paoletti (2006). Secondo gli Autori, il caso di vena inferiore aderente, sebbene più difficile da trattare analiticamente, si verifica con maggiore frequenza rispetto a quanto in genere previsto, anche in presenza di sistemi di ventilazione. Gli Autori osservano sperimentalmente che, in presenza di condotti di aerazione di diametro troppo piccolo, o troppo scabri, o troppo corti, la ventilazione si traduce in un intrappolamento di aria all'interno della corrente piuttosto che in un'efficace aerazione della superficie libera, il che determina un aumento dei tiranti. Ciò comporta che il sistema possa entrare in pressione per portate inferiori a quelle previste, ovvero in occasione di eventi meteorici di entità

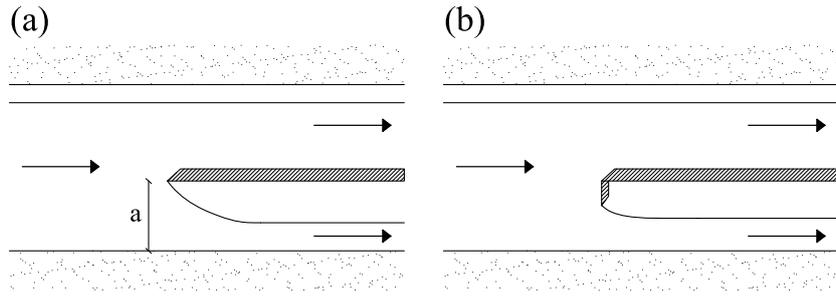


Figura 3.1: Modello del partitore frontale secondo Cozzo (1979) (a) e secondo Mutti e Paoletti (2006) (b).

anche modesta. Vengono infine presentate considerazioni pratiche, con riferimento alla presenza di un setto verticale solidale a quello orizzontale che limiti la luce inferiore, illustrato in Fig. 3.1(b). Risulta in particolare che, per una corrente in arrivo con basso contenuto energetico, un setto che arrivi a maggiore profondità comporta maggiori portate derivate, minori pressioni nel derivatore e un numero maggiore di condizioni di deflusso della corrente in arrivo per cui il derivatore non è in pressione per la sua intera lunghezza; viceversa, per correnti in arrivo ad alto contenuto energetico, un setto meno approfondito comporta minori portate derivate e maggiori pressioni, ma non influisce sull'estensione del regime di pressurizzazione. Inoltre, per correnti in arrivo ad alto contenuto energetico, le portate derivate sono tanto maggiori quanto minore è la lunghezza del derivatore.

# Capitolo 4

## Apparato sperimentale

E questa speranza si faccia più volte, acciò che qualche accidente non impedissi o falsassi tal prova, che le speranza fussi falsa, e ch'ella ingannassi o no il suo speculatore.

---

Leonardo da Vinci

Lo studio sperimentale del partitore semi-frontale è stato sviluppato nell'ambito di una convenzione stipulata tra il Commissariato Straordinario Emergenza Sottosuolo ed l'ex Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale (DIGA), oggi Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, avente come oggetto la realizzazione di modelli fisici di scaricatori di piena semi-frontali da realizzarsi lungo la Nuova Collettrice di Via Tasso. La configurazione scelta per il manufatto è caratterizzata dalla presenza di un setto verticale e uno orizzontale che individuano una luce all'interno della sezione principale, di forma rettangolare (Fig. 4.1); l'aliquota maggiore della corrente si propagherà sostanzialmente indisturbata nel collettore principale, mentre quella minore verrà convogliata nel canale di derivazione individuato dai setti e quindi deviata in un ramo secondario del sistema fognario, posto alla stessa quota del canale principale. Non esistendo soddisfacenti indicazioni progettuali riguardanti questo genere di manufatti, si è resa necessaria un'indagine sperimentale su di un modello in scala che vada a simulare il comportamento del derivatore in corrispondenza della specifica intersezione in cui si intende posizionarlo.

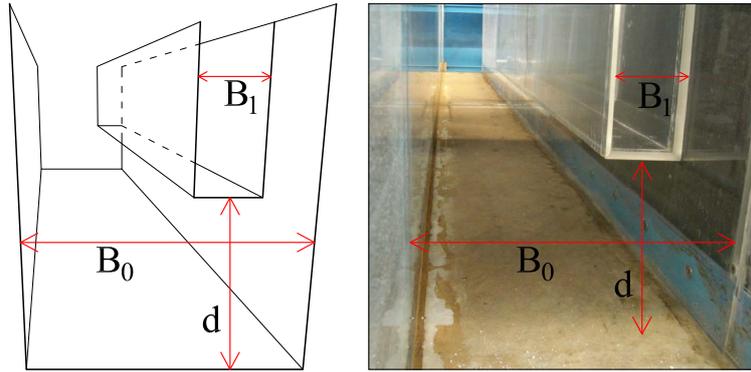


Figura 4.1: Schema e fotografia del partitore semifrontale.

## 4.1 I principi della similitudine

Nella teoria della modellazione dei fenomeni fisici, con particolare riferimento all'idraulica, due sistemi si definiscono “simili” quando vige, tra loro, una similitudine *geometrica*, riguardante le dimensioni, una similitudine *cinematica*, riguardante le velocità e una similitudine *dinamica*, riguardante le forze (Pulci Doria, 2001; Chanson, 2004). Nel primo caso, i rapporti tra tutte le lunghezze caratteristiche del prototipo (il sistema reale) e le corrispondenti lunghezze del modello devono essere uguali; nel secondo caso, l'uguaglianza sussiste per i rapporti tra le velocità del prototipo e del modello; nel terzo caso, tra le forze. Una volta garantite tali uguaglianze, possono essere dedotte similitudini “secondarie” tra tutti gli altri parametri che regolano il processo oggetto di interesse, che si possono suddividere in:

- Proprietà del fluido e costanti fisiche: densità del fluido  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], viscosità dinamica  $\mu$  [N s/m<sup>2</sup>], tensione superficiale  $\sigma$  [N/m], modulo di elasticità  $E$  [Pa], accelerazione di gravità  $g$  [m/s<sup>2</sup>].
- Proprietà geometriche del canale e della corrente: tutte le lunghezze caratteristiche  $L$  [m].
- Proprietà della corrente: velocità  $v$  [m/s] (oppure portata  $Q$  [m<sup>3</sup>/s]), gradiente di pressione  $\Delta P$  [Pa].

Qualsiasi fenomeno fisico può essere espresso come funzione dei parametri che governano il processo, nella forma:

$$\mathcal{F}_1(\rho, \mu, \sigma, E, g, L, v, \Delta P) = 0 \quad (4.1)$$

Secondo il teorema di Buckingham (Buckingham, 1915), anche noto come Teorema II, se un processo fisico è regolato da  $m$  parametri (nell'esempio

$m = 8$ ), per un totale di 3 dimensioni (lunghezza, massa e tempo), allora lo stesso fenomeno può essere rappresentato da una diversa funzione, le cui variabili sono tutte adimensionali e in numero di  $n = m - 3 = 5$ :

$$\mathcal{F}_2\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}, \frac{\rho v^2}{\Delta P}, \frac{\rho v L}{\mu}, \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}}}, \frac{v}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}\right) = \mathcal{F}_2(Fr, Eu, Re, We, Ma) = 0 \quad (4.2)$$

dove  $Fr$  è il numero di Froude, che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze di gravità;  $Eu$  è il numero di Eulero, che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze di pressione;  $Re$  è il numero di Reynolds, che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosse;  $We$  è il numero di Weber, che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze capillari;  $Ma$  è il numero di Sarrau–Mach (anche noto come numero di Cauchy), che rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze di elasticità. Il prototipo e il modello di un processo fisico sono dunque simili se viene rispettata l'uguaglianza dei numeri adimensionali tra i due sistemi.

Generalmente, il primo rapporto di scala che viene fissato durante il processo di modellazione è quello delle lunghezze, che dipende in buona sostanza dagli spazi a disposizione per la sperimentazione; è dunque noto il rapporto  $\underline{l}$  tra le lunghezze del modello e quelle del prototipo:

$$\frac{l_M}{l_P} = \underline{l} \quad (4.3)$$

Inoltre, l'accelerazione di gravità assume ovviamente un unico valore nel modello e nel prototipo, cosicché il rapporto  $\underline{g}$  è pari a 1. Imposta dunque la scala delle lunghezze e quella delle accelerazioni, l'utilizzo dello stesso fluido nei due sistemi comporta l'impossibilità di ottenere una perfetta similitudine. A titolo di esempio si osservino i rapporti di scala delle velocità ottenuti imponendo l'uguaglianza tra i valori del prototipo e del modello dei numeri adimensionali dell'Eq. (4.2):

$$R_M = Re_P \implies \frac{\rho v_M l_M}{\mu} = \frac{\rho v_P l_P}{\mu} \implies \underline{v} = \underline{l}^{-1} \quad (4.4)$$

$$Fr_M = Fr_P \implies \frac{v_M^2}{gL_M} = \frac{v_P^2}{gL_P} \implies \underline{v} = \sqrt{\underline{l}} \quad (4.5)$$

$$We_M = We_P \implies \frac{v_M^2}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho l_M}}} = \frac{v_P^2}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho l_P}}} \implies \underline{v} = \underline{l}^{-1/2} \quad (4.6)$$

$$Ma_M = Ma_P \implies \frac{v_M}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} = \frac{v_P}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}} \implies \underline{v} = 1 \quad (4.7)$$

Nell'ipotesi di adoperare lo stesso fluido per il modello e il prototipo, le Eqq. (4.4), (4.4), (4.6) e (4.7) forniscono quattro diverse scale per le velocità incompatibili tra loro. Tuttavia, nella pratica è molto difficile individuare un fluido le cui proprietà riescano a ricreare in modo esatto una completa similitudine; per questo, è in genere sufficiente considerare nell'Eq. (4.1) soltanto i parametri fondamentali, il che equivale a soddisfare soltanto uno dei possibili criteri di similitudine. Nel campo dell'idraulica, in genere i numeri di Mach sono molto piccoli sia nel prototipo che nel modello, e anche la similitudine relativa ai numeri di Weber è quasi sempre soddisfatta (gli effetti della tensione superficiale e della comprimibilità sono infatti quasi sempre trascurabili); nei moti in pressione si fa dunque riferimento alla similitudine di Reynolds, mentre nelle correnti a pelo libero, data la maggiore importanza della forza di gravità, si fa riferimento alla similitudine di Froude. In quest'ultimo caso, sono ritenuti trascurabili gli effetti di scala indotti dalla viscosità e dalla tensione superficiale, e ciò è tanto più vero quanto più è grande la turbolenza; tuttavia, gli effetti relativi al numero di Weber potrebbero non essere trascurabili in presenza di fenomeni di intrappolamento d'aria in un fluido, soprattutto per alti valori del rapporto aria/acqua (Chanson, 2004).

Fissati i rapporti  $\underline{l}$  e  $\underline{g}$  (quest'ultimo pari a 1), scelta la similitudine di Froude (che equivale ad aver scelto come rapporto di scala delle velocità il valore dell'Eq. (4.5)) e stabilito di usare nel modello lo stesso fluido del prototipo, di densità  $\rho$ , i rapporti di scala delle altre grandezze di interesse sono dunque i seguenti:

$$\underline{A} = \underline{l}^2 \quad (4.8)$$

$$\underline{W} = \underline{l}^3 \quad (4.9)$$

$$\underline{t} = \underline{l}^{1/2} \quad (4.10)$$

$$\underline{Q} = \underline{l}^{5/2} \quad (4.11)$$

$$\underline{\Delta P} = \underline{l} \quad (4.12)$$

dove con  $A$  si sono indicate le aree e con  $W$  i volumi.

## 4.2 Il modello fisico del partitore

Tenendo conto degli spazi e delle attrezzature disponibili presso il Laboratorio di Idraulica del DICEA, si è deciso per un rapporto di scala delle lunghezze pari a 0.15. I valori dei rapporti di scala delle grandezze oggetto



Figura 4.2: Il canale a pendenza variabile del Laboratorio di Idraulica del DICEA.

di interesse sono dunque:

$$\underline{l} = 0.15 \quad (4.13)$$

$$\underline{v} = 0.3873 \quad (4.14)$$

$$\underline{A} = 0.0225 \quad (4.15)$$

$$\underline{W} = 0.003375 \quad (4.16)$$

$$\underline{t} = 0.3873 \quad (4.17)$$

$$\underline{Q} = 0.008714 \quad (4.18)$$

$$\underline{\Delta P} = 0.15 \quad (4.19)$$

#### 4.2.1 Il canale a pendenza variabile

Il modello della nuova collettrice di via Tasso, con annesso partitore da progettare, è stato installato su un canale a pendenza variabile già presente nel laboratorio, le cui dimensioni hanno appunto condizionato quelle da assegnare al modello.

Il canale, largo 0.79 m, profondo 0.60 m e lungo 20 m (Fig. 4.2), con fondo in marmo e pareti laterali in vetro, è montato su una struttura di supporto in acciaio incernierata su un fulcro fisso nell'estremità di valle e su un traliccio mobile nell'estremità di monte. Quando il canale è in posizione orizzontale, il traliccio è alloggiato in un pozzo profondo circa 10 m e può essere sollevato mediante una vite senza fine comandata elettricamente e un sistema di contrappesi. Tale sistema consente di raggiungere pendenze fino a 25°. L'alimentazione del canale è garantita da un'elettropompa a velocità variabile, collocata tra il fulcro di valle ed il fondo del canale stesso; la pompa può lavorare in aspirazione da una vasca di circa 30 m<sup>3</sup> immediatamente sottostante la struttura di supporto del canale. Nella vasca è installata anche



Figura 4.3: Il pannello di controllo del canale a pendenza variabile.

una piccola pompa sommersa, necessaria all'avviamento del sistema: non potendo la pompa principale lavorare in aspirazione con aria, è necessario riempire prima il sistema con la piccola pompa, per poi poter avviare l'altra.

La condotta di mandata, del diametro nominale di 300 mm, è posizionata all'interno della struttura di supporto e corre al di sotto del fondo del canale, convogliando la portata in un cassone collocato in testa al canale stesso. Lungo la condotta sono installati due misuratori di portata: uno elettromagnetico, attualmente non funzionante, ed uno a diaframma. Il cassone di testa è collegato al canale mediante raccordi smussati ed è dotato di una paratoia che ne permette il funzionamento sia a pelo libero che in pressione. La regolazione della portata avviene mediante una valvola a farfalla, comandata sia elettricamente che manualmente, posta immediatamente a valle della pompa. Tutti i sistemi elettrici sono collegati ad un pannello di controllo posto in prossimità dell'estremità di valle del canale (Fig. 4.3).

#### 4.2.2 Il modello del collettore e del partitore semifrontale

Per riprodurre nella scala stabilita la Nuova Collettrice di Via Tasso, che nel tronco di interesse è di forma rettangolare con una larghezza di 2 m, un'altezza di 2.50 m ed una pendenza pari a circa il 5%, la sezione del canale a pendenza variabile è stata parzializzata mediante un setto verticale in Plexiglas, ben vincolato per impedire che si muovesse sotto la spinta della corrente. Il setto individua un canale rettangolare di larghezza pari a 30 cm con il fondo in marmo, la parete in destra idraulica in Plexiglas e quella in sinistra idraulica in vetro. Per ridurre gli effetti all'imbocco del canale, all'interno del cassone di testa è stato inserito un raccordo sagomato.

La lunghezza del tronco di collettore da riprodurre nel modello fisico, sia a monte che a valle del manufatto di partizione, è stata stabilita considerando le caratteristiche cinematiche della corrente. Infatti, poiché questa è ipercritica e quindi comandata da monte, la lunghezza del tronco a monte del manufatto è tale da garantire l'instaurarsi delle condizioni di moto uniforme; la lunghezza del tronco a valle del manufatto è invece ininfluenta.

Il modello del partitore è stato realizzato interamente in Plexiglas: si tratta di una canna rettangolare inserita all'interno del canale, ancorata alla parete in destra idraulica con del collante. Ciascun elemento del modello risulta quindi in materiale trasparente per consentire la verifica visiva del comportamento idraulico dell'opera. Al derivatore, tratto successivo del partitore stesso, è stata collegata una tubazione in PVC del diametro di 400 mm per condurre la portata derivata ai cassoni di alimentazione di due gole venturimetriche, con la possibilità di interrompere l'alimentazione di uno dei due. Le gole venturimetriche, a loro volta, recapitano l'acqua in una canalizzazione che la restituisce alla vasca di alimentazione del canale a pendenza variabile. La scelta di un diametro piuttosto ampio per la tubazione di scarico è stata dettata dall'esigenza di non influire minimamente sulle condizioni di deflusso della corrente, e quindi sul funzionamento del partitore, allontanando la possibilità di rigurgito.

Per consentire di variare l'altezza del setto orizzontale rispetto al fondo, il partitore ha la possibilità di ruotare intorno all'asse della condotta di scarico, ortogonale al derivatore e posizionata nella parte terminale dello stesso. La condotta di scarico ruota all'interno di una flangia in Plexiglas solidale alla parete in destra idraulica del modello del collettore, dotata di una guarnizione in gomma e lubrificata con vaselina. Ruotando la condotta, il partitore si solleva variando la distanza del setto orizzontale dal fondo. La posizione della canna è successivamente resa stabile agendo su una vite di serraggio solidale al manufatto e libera di scorrere in un'asola a forma di settore circolare, concentrica all'asse di rotazione, realizzata nella parete in Plexiglas.

Non essendo possibile variare la larghezza della canna, sono state realizzate due canne facilmente intercambiabili di diversa larghezza. Lo spessore dei setti costituenti le due canne è di 8 mm; il bordo del setto aderente alla parete del canale è stato smussato, per entrambi i manufatti, con un quarto di cilindro di raggio 8 mm (Fig. 4.5(a)) e con il centro sulla superficie di contatto tra manufatto e parete. Per il primo manufatto, largo 90 mm, è stato adottato lo stesso tipo di smusso anche per il setto orizzontale e quello verticale, mentre il secondo manufatto, largo 138 mm, è stato smussato con un semicilindro di raggio 4 mm (Fig. 4.5(b)). L'apparato sperimentale è rappresentato in Fig. 4.4.

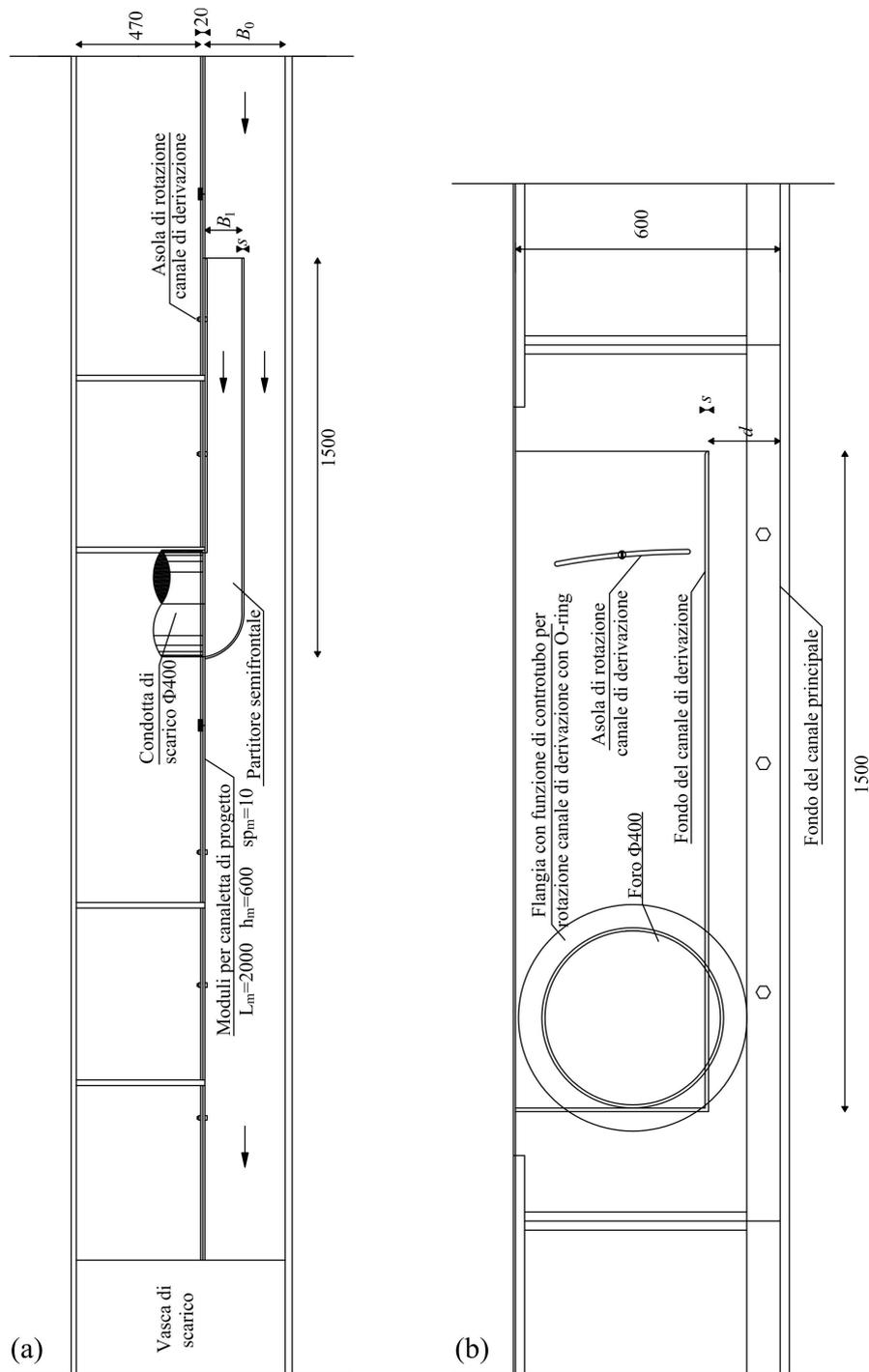


Figura 4.4: Pianta (a) e profilo (b) del modello fisico del partitore. Tutte le grandezze sono espresse in [mm];  $B_0=300$  mm;  $s=8$  mm;  $d$  e  $B_1$  sono variabili.

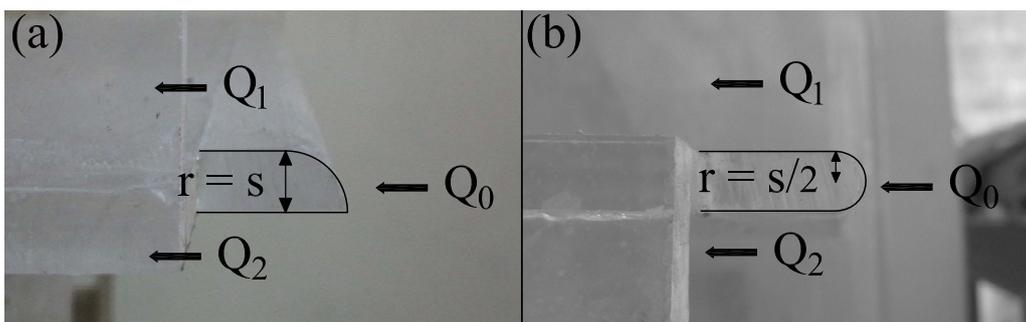


Figura 4.5: Profilo a spigolo vivo (a) e arrotondato (b) per il setto orizzontale e il setto verticale in sinistra idraulica del partitore. Il setto verticale in destra idraulica è sempre del tipo (a);  $s$  è lo spessore del setto, pari a 8 mm.

### 4.2.3 Attrezzature

L'impianto sperimentale è corredato da una serie di strumenti necessari per misurare i valori della portata in ingresso al sistema e della portata derivata, nonché dei livelli idrici all'interno del derivatore e del canale principale, sia a monte che a valle della partizione. La portata defluente nell'emissario, ovvero nella porzione di canale alla sinistra idraulica del partitore, viene desunta come differenza tra la portata immessa nel canale e quella defluente nel derivatore.

- *Misura della portata immessa nel canale.* La portata inviata al sistema viene misurata attraverso un diaframma installato sulla tubazione di collegamento tra la vasca di scarico e il cassone di alimentazione. Il diaframma determina una variazione di quota piezometrica  $\Delta h$ , letta tramite un manometro differenziale a mercurio, che è proporzionale alla portata inviata tramite un coefficiente  $K'$ , secondo la seguente relazione:

$$Q = K' \cdot \sqrt{\Delta h} \quad (4.20)$$

dove  $\Delta h$  è il dislivello letto al piezometro, caratterizzato da un errore massimo pari a  $\pm 0.5$  mm. Il coefficiente  $K'$  dipende dal rapporto di strozzamento, dalla geometria dello strumento, dalla posizione delle prese di pressione e dal  $Re$  della corrente. Per determinarne l'entità, è stata necessaria una taratura preliminare effettuata prima dell'installazione del modello del partitore; ciascun valore di  $\Delta h$  ricreato al manometro differenziale può essere messo in relazione al valore di portata misurato all'estremità di valle del canale, tramite uno stramazzo Thomson e uno stramazzo a larga soglia, attraverso le seguenti scale

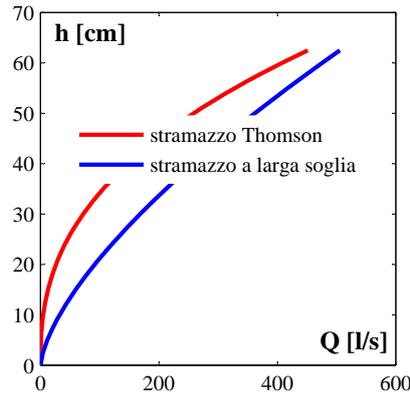


Figura 4.6: Scale di deflusso degli stramazzi impiegati per la taratura del diaframma.

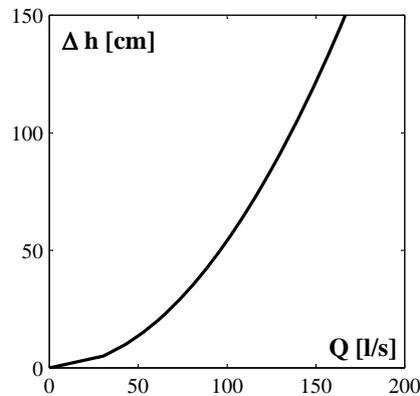


Figura 4.7: Scala di deflusso del diaframma per la misura della portata in ingresso.

di deflusso:

$$Q = 0.33 \cdot h^2 \cdot \sqrt{2gh} \quad (4.21)$$

$$Q = 0.385 \cdot Bh \cdot \sqrt{2gh} \quad (4.22)$$

dove  $h$  è il tirante letto a monte della chiamata allo sbocco, mentre i coefficienti di efflusso sono stati ricavati a partire dalla geometria dei due manufatti (Fig. 4.6). La taratura ha fornito  $K' = 0.136 \text{ m}^{5/2}/\text{s}$  (Fig. 4.7).

- *Misura della portata derivata.* Come già detto, la portata che imbocca il partitore defluisce lungo il canale derivatore individuato dalla canna in Plexiglas, che la convoglia in una tubazione di ampio diametro; infine, la portata perviene a due gole venturimetriche, costituite da cassoni di acciaio caratterizzati da una larghezza di base e un successivo restringimento (Fig. 4.8). Per effetto del raggiungimento dello stato critico in corrispondenza del restringimento, la portata defluente nel



Figura 4.8: Gole venturimetriche.

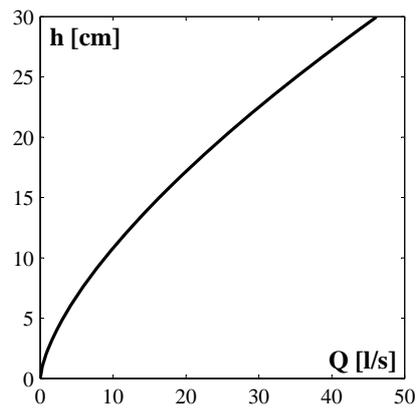


Figura 4.9: Scala di deflusso delle gole venturimetriche per la misura della portata derivata.

cassone è legata al tirante  $h$  a monte del restringimento tramite la seguente scala di deflusso:

$$Q = \mu \cdot Bh \cdot \sqrt{2gh} \quad (4.23)$$

dove  $B$  è la larghezza maggiore del cassone e  $\mu$  è il coefficiente di efflusso, pari a 0.423 per lo specifico rapporto tra i due valori di larghezza caratteristici (Fig. 4.9). Il tirante idrico viene letto a mezzo di un idrometro a punta caratterizzato da un errore massimo di  $\pm 0.05$  mm

- *Misure di livello.* Per la misura dei livelli idrici nei canali di interesse è stato adoperato un idrometro a punta. Esso è costituito da una punta mobile realizzata in un materiale resistente alla corrosione (nello specifico ottone), sostenuta verticalmente, a mezzo di una barra filettata, da un regolo metallico graduato al millimetro che costituisce la scala graduata principale, mentre il cursore lungo cui avviene lo scorrimento costituisce la scala graduata secondaria, che permette di aumentare l'accuratezza delle misure al decimo di millimetro, con un errore massimo di  $\pm 0.05$  mm. La struttura è a sua volta fissata su un coordinatometro, costituito da una slitta che consente all'idrometro di scorrere lungo la larghezza del canale, per effettuare misure lungo diverse verticali della stessa sezione idrica.

Bisogna precisare che il regolo graduato costituisce un sistema di riferimento per le quote del tutto arbitrario, per cui dopo il montaggio del coordinatometro è necessario tarare la scala misurando la quota di un punto di riferimento, ad esempio il fondo del canale, che viene assunto come zero.

L'impianto sperimentale è corredato di idrometri a punta in diverse sezioni del canale. Il primo è stato sistemato 180 cm a monte dell'imbocco del partitore, in modo da misurare il livello  $h_0$  di moto uniforme esattamente al centro della sezione, per evitare la possibile influenza delle pareti laterali. Il secondo idrometro è stato sistemato in prossimità dell'imbocco del partitore ed è destinato alla lettura sia del tirante  $h_1$  della corrente derivata, sia del tirante  $h_2$  della corrente defluente nell'emissario. Per consentire la misura di entrambi i tiranti, al regolo graduato è stata avvitata una punta piegata capace di penetrare, per un brevissimo tratto, all'interno del partitore. Il coordinatometro permette di portare la punta in asse al ramo di corrente da misurare, ancora una volta per causare la minima influenza possibile delle pareti laterali (Fig. 4.10). Altre due punte idrometriche sono state posizionate nei cassoni venturimetrici, per la misura dei livelli idrici da correlare alla portata derivata.



Figura 4.10: Coordinatometro e idrometro a punta per la misura del livello idrico.

A causa delle condizioni di moto turbolento della corrente defluente nel canale, per pervenire a una misura del livello di una certa affidabilità si sono eseguite di volta in volta quattro letture, successivamente mediate per bilanciare gli errori casuali.

Lungo il canale derivatore sono state posizionate infine delle aste idrometriche, costituite da semplici aste graduate, preferite alle punte per l'impossibilità di accedere all'interno del manufatto. La lettura operata tramite questi strumenti, seppure più imprecisa rispetto a quella effettuata da una punta idrometrica (l'errore massimo è infatti pari a  $\pm 0.5$  mm), è stata necessaria per avere un'indicazione di massima dei livelli idrici caratteristici della corrente lungo il derivatore.

- *Misure di velocità media locale.* Per la misura della velocità in punti prestabiliti del canale è stato impiegato un tubo di Pitot, costituito da un tubo molto sottile, di diametro pari a 1.6 mm, con un'estremità rivolta controcorrente e l'altra collegata ad un piezometro. Come si può vedere in Fig. 4.11, il tubo di Pitot utilizzato è stato sostituito all'ago di un idrometro, che ne costituisce il supporto, ed è collegato tramite un tubicino in gomma ad un piezometro la cui scala graduata ha come piano di riferimento delle quote il fondo del canale nella stessa sezione in cui è ubicato lo strumento; l'errore massimo di lettura è pari a  $\pm 0.5$  mm. Applicando il teorema di Bernoulli tra il punto A di

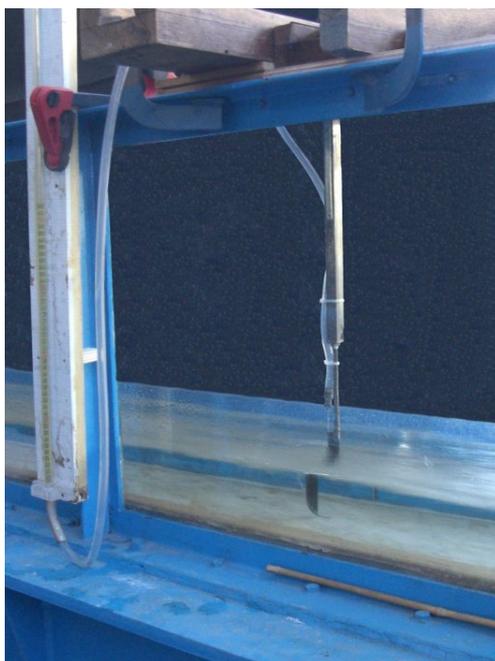


Figura 4.11: Tubo di Pitot per la misura della velocità dell'acqua.

misura e un punto B appartenente al menisco di risalita dell'acqua nel piezometro, essendo quest'ultimo in condizioni idrostatiche si ha:

$$h_A + \frac{V_A^2}{2g} = h_B \quad (4.24)$$

che permette di conoscere la velocità nel punto A una volta misurati il tirante idrico  $h_A$  nella sezione cui A appartiene e la risalita  $h_B$  nel piezometro, a partire dalla stessa quota di riferimento.

### 4.3 Sintesi della sperimentazione

Nella Fig. 4.12 è mostrato lo schema del partitore con la simbologia utilizzata per le grandezze geometriche e idrauliche. Con il pedice  $0$  sono indicati i parametri relativi al canale immissario (larghezza, tirante, portata), mentre con il pedice  $1$  si sono indicati gli stessi parametri, che competono però al canale derivatore; i pedici  $2$  e  $3$  si riferiscono infine al canale emissario, rispettivamente in sinistra idraulica e al di sotto del partitore. In particolare, è stato possibile misurare il tirante  $h_2$ , e solo in alcune circostanze il tirante  $h_3$ ; la portata  $Q_2$  è stata invece valutata come differenza tra la portata in ingresso al sistema  $Q_0$  e quella derivata  $Q_1$ , e pertanto si riferisce al canale emissario nella sua globalità.

Sono state effettuate un totale di 63 prove, ed in particolare 24 caratterizzate da una pendenza del canale del 5%, 21 con una pendenza del 2% e

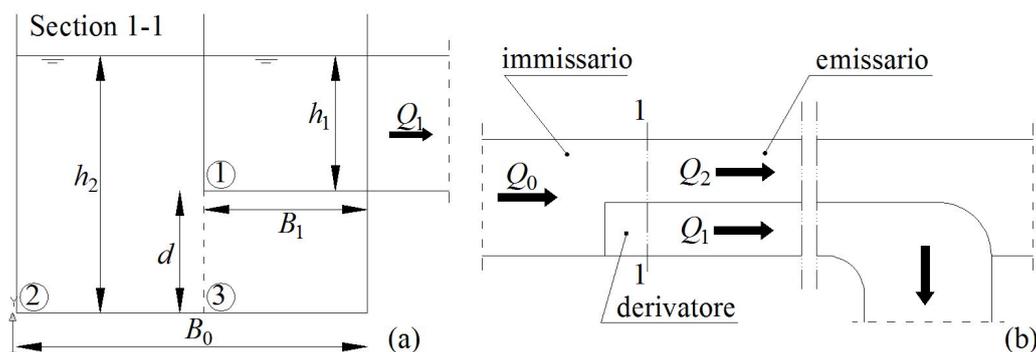


Figura 4.12: Schema della sezione trasversale (a) e della pianta (b) del partitore semifrontale.

Tabella 4.1: Sintesi degli esperimenti.

$i$	5%		2%		1%	
$N$	24		21		18	
$d$ [mm]	min 23	max 106	min 20	max 150	min 100	max 220
$B_1$ [mm]	90	138	90	138	90	138
$h_0$ [mm]	80	139	77	206	195	288
$h_1$ [mm]	25	124	36	211	24	180
$Q_0$ [l/s]	83.12	153.79	48.70	167.26	121.17	182.53
$Q_1$ [l/s]	5.85	49.28	1.92	58.52	4.24	51.73
$V_0$ [m/s]	3.38	3.77	2.01	2.75	2.07	2.23
$V_1$ [m/s]	2.10	3.64	0.27	2.70	1.84	2.22
$Re_0$	716671	1075735	428856	948510	702157	862719
$Re_1$	168224	586078	30893	498438	123195	415248
$F_0$	3.16	3.94	1.90	2.43	1.26	1.50
$F_1$	2.79	5.70	0.28	4.02	1.56	4.08

18 con una pendenza dell'1%. Per ognuno dei tre gruppi, sono state investigate entrambe le larghezze disponibili per il partitore, modellate da due diverse canne in Plexiglas. Per ognuna delle due larghezze sono state effettuate prove al variare della portata inviata e della distanza dell'intradosso del derivatore dal fondo dell'immissario. In Tab. 4.1 sono riportati i parametri massimi e minimi caratteristici della sperimentazione, con particolare riferimento alla distanza del partitore dal fondo  $d$ , larghezza del manufatto  $B_1$ , tiranti, portate, velocità, numeri di Reynolds e di Froude nell'immissario ( $h_0$ ,  $Q_0$ ,  $V_0$ ,  $Re_0$  e  $F_0$ ) e nel derivatore ( $h_1$ ,  $Q_1$ ,  $V_1$ ,  $Re_1$  e  $F_1$ ). Visti i valori assunti dai parametri che regolano il fenomeno di interesse, l'effetto della tensione superficiale si conferma trascurabile, essendo tutti i tiranti sperimentali sempre maggiori di 15 mm (Novak e altri, 2010), e nel complesso non risultano importanti effetti di scala, essendo  $h_0$  sempre minore di 63 cm (Heller, 2011).

# Capitolo 5

## Analisi dei risultati

Io stimo più il trovar un vero,  
benché di cosa leggiera, che 'l  
disputar lungamente delle  
massime questioni senza  
consequir verità nissuna.

---

Galileo Galilei

Con riferimento allo stato dell'arte, le prime osservazioni si sono concentrate sulle condizioni di deflusso della corrente in prossimità dell'imbocco del partitore, ed in particolare verificando la presenza o meno di una vena aerata distaccata sia dal setto verticale che da quello orizzontale, sia all'esterno che all'interno del manufatto.

Per quanto riguarda l'esterno, la vena distaccata sia dal setto verticale che dall'intradosso del fondo del partitore è risultata sempre ben aerata; in alcuni casi in cui si è riusciti a indurre una condizione di vena aderente, è stata sufficiente una minima perturbazione della superficie libera a monte del partitore per innescare un richiamo di aria e ripristinare la condizione di vena aerata. Da questo punto di vista, quindi, la corrente risulta automaticamente aerata e non necessita di un sistema di ventilazione artificiale, come suggerito da Cozzo (1979), la cui efficace realizzazione presenta delle difficoltà (Mutti e Paoletti, 2006). Inoltre, in accordo con la bibliografia, è stata notata una diminuzione della portata derivata nel caso di vena esterna aderente ai bordi esterni, poiché la depressione indotta dalla curvatura dei filetti fluidi determina un maggiore richiamo di portata all'esterno del manufatto di partizione. La Fig. 5.1 mostra un esempio di vena aerata (a) e di vena aderente (b).

All'interno del manufatto, invece, le condizioni di deflusso si sono rivelate meno stabili, poiché dipendenti dalla geometria del partitore e dall'entità della portata derivata. Si sono riscontrate le seguenti condizioni di deflusso:

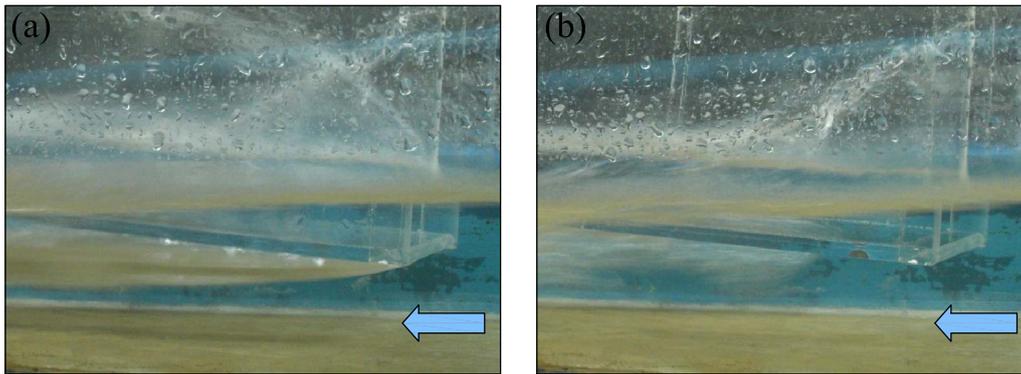


Figura 5.1: Condizioni di deflusso all'esterno del manufatto nel caso di vena ben aerata (a) e vena aderente (b).

- **A** Corrente veloce aderente sia alle pareti laterali (lato interno) sia al fondo del partitore (estradosso) (Fig. 5.2);
- **B** Corrente veloce con vena aderente al fondo e alla parete interna in destra idraulica, ma distaccata dalla parete interna sinistra del partitore (Fig. 5.2);
- **C** Corrente veloce con vena distaccata dalla parete sinistra (lato interno) e dal fondo (estradosso), e aderente alla parete interna in destra idraulica (Fig. 5.3);
- **D** Distacco della vena da entrambe le pareti interne del partitore e dall'estradosso del setto orizzontale (Fig. 5.3);
- **L** Corrente lenta con formazione di un risalto idraulico a monte del manufatto (Fig. 5.4).

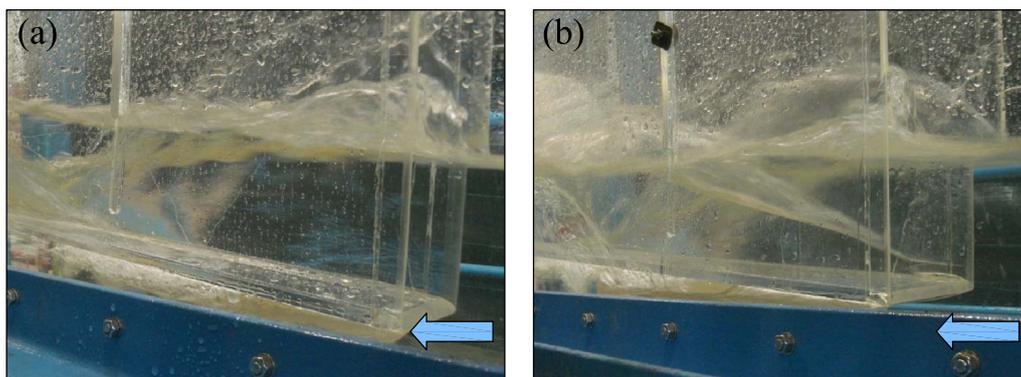


Figura 5.2: Condizioni di deflusso A (a) e B (b) all'interno del manufatto.

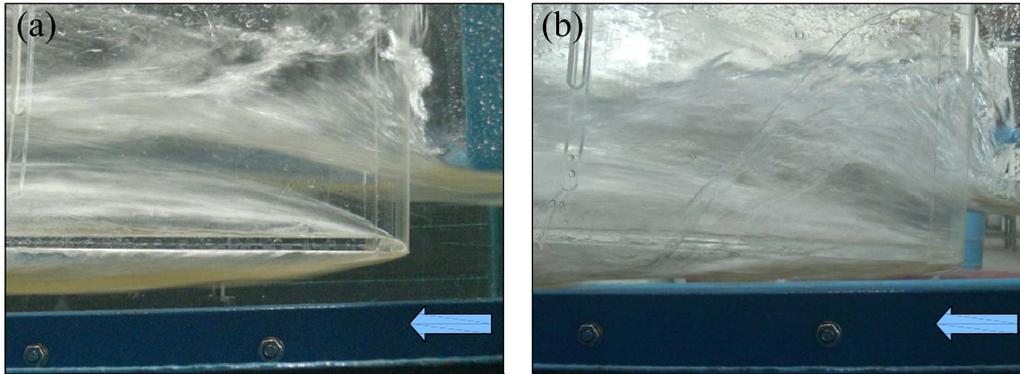


Figura 5.3: Condizioni di deflusso C (a) e D (b) all'interno del manufatto.

Le condizioni A e B si sono rivelate quelle più frequenti; tra le due, differenti unicamente per il distacco della vena dalla parete in sinistra idraulica, non si è riscontrata una sensibile differenza di comportamento in merito all'entità della portata derivata. Le condizioni C e D si sono riscontrate ognuna durante una sola prova. Il susseguirsi delle diverse condizioni di deflusso appare legato al numero di Froude della corrente defluente nel canale principale: supponendo infatti di suddividere i dati sperimentali in tre gruppi caratterizzati rispettivamente da  $F_0 < 2$ ,  $2 < F_0 < 3$  e  $F_0 > 3$ , la condizione A si verifica nel 92% dei casi nel primo gruppo, nel 78% dei casi nel secondo gruppo e mai nel terzo gruppo. La condizione B si verifica invece nell'8% dei casi nel primo gruppo, nel 22% dei casi nel secondo gruppo e nell'89% dei casi nel terzo gruppo, dove la restante percentuale è formata dall'unico evento di tipo C e dall'unico evento di tipo D.

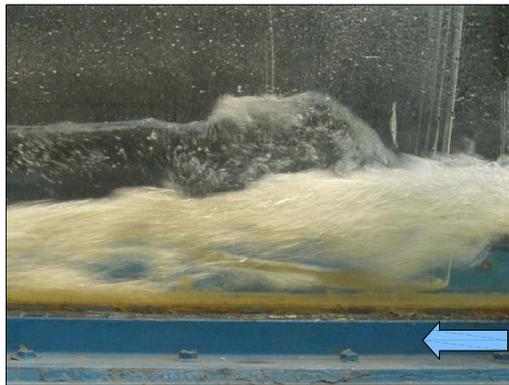


Figura 5.4: Condizione di deflusso L all'interno del manufatto.

La condizione L si è verificata solo per una pendenza del canale pari al 2% e un valore della distanza  $d$  dal fondo molto basso, tra i 2 e i 4 cm, cosicché il derivatore risultava in contropendenza rispetto al canale principale; poiché

tale caso non ha rilevanza tecnica, i corrispondenti risultati non sono stati considerati nella successiva analisi teorica.

## 5.1 Definizione della scala di deflusso

### 5.1.1 Analisi dimensionale

Successivamente alla raccolta dei dati, la prima operazione è stata un'indagine esplorativa per verificare l'esistenza di dipendenze tra le variabili che regolano il fenomeno oggetto di studio, mediante la tecnica dell'analisi dimensionale.

Tenendo presente i principi della teoria della similitudine illustrati nel precedente capitolo, per prima cosa si è espresso il processo di partizione mediante una stringa di parametri significativi:

$$\mathcal{F}_1(h_0, h_1, B_0, B_1, d, g, Q_0, Q_1) = 0 \quad (5.1)$$

Scegliendo  $h_0$  e  $g$  come grandezze di riferimento, l'Eq. (5.1) può essere adimensionalizzata nella seguente:

$$\mathcal{F}_2\left(\frac{h_1}{h_0}, \frac{B_0}{h_0}, \frac{B_1}{h_0}, \frac{d}{h_0}, \frac{Q_0}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}}, \frac{Q_1}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}}\right) = 0 \quad (5.2)$$

da cui, estrapolando la portata derivata adimensionale, si ottiene:

$$\frac{Q_1}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}} = f\left(\frac{Q_0}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}}, \frac{B_0}{h_0}, \frac{B_1}{h_0}, \frac{h_1}{h_0}, \frac{d}{h_0}\right) \quad (5.3)$$

che può essere più concretamente espressa da:

$$\frac{Q_1}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}} = \left(\frac{Q_0}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{B_0}{h_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{B_1}{h_0}\right)^{C_3} \cdot \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{C_4} \cdot \left(\frac{d}{h_0}\right)^{C_5} \quad (5.4)$$

dove  $C_1, C_2, \dots, C_5$  sono esponenti incogniti. Una semplificazione dell'espressione perviene dalla considerazione che i parametri  $h_0, h_1$  e  $d$  sono in realtà legati tra loro dalla relazione  $h_1 = h_0 - d$ , come testimoniato dall'evidenza sperimentale mostrata nella Fig. 5.5.

Di conseguenza, appare più corretto considerare un'unica variabile, che si è scelta essere  $1 - d/h_0$ . L'Eq. (5.4) diventa dunque la seguente:

$$\frac{Q_1}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}} = \left(\frac{Q_0}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}}\right)^{C_1} \cdot \left(\frac{B_0}{h_0}\right)^{C_2} \cdot \left(\frac{B_1}{h_0}\right)^{C_3} \cdot \left(1 - \frac{d}{h_0}\right)^{C_4} \quad (5.5)$$

A questo punto, utilizzando i dati raccolti, è possibile tarare i coefficienti incogniti, che risultano essere:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.03 \\ C_2 &= -1.11 \\ C_3 &= 1.11 \\ C_4 &= 0.81 \end{aligned} \quad (5.6)$$

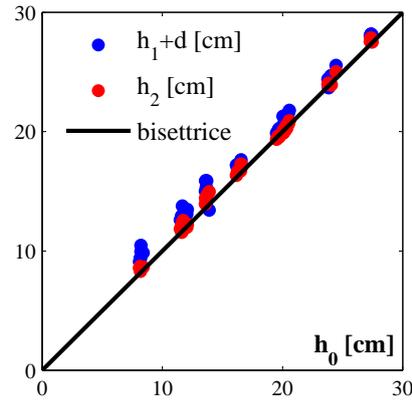


Figura 5.5: Relazione tra i tiranti nel canale immissario, nel derivatore e nell'emissario.

La qualità della regressione è pienamente soddisfacente, come è possibile verificare graficamente dal confronto tra i valori sperimentali e calcolati della variabile indipendente, mostrato in Fig. 5.6.

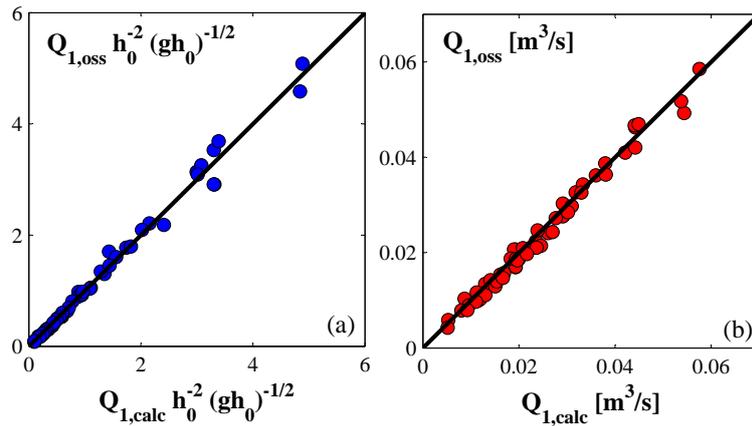


Figura 5.6: Confronto tra i valori sperimentali e previsti dall'Eq. (5.5) con i valori dei coefficienti dell'Eq. (5.6) in termini adimensionali (a) e dimensionali (b).

Allo scopo di effettuare un raggruppamento per meglio comprendere le dipendenze funzionali tra le variabili in esame, si possono approssimare i valori dei coefficienti ricavati dalla taratura e riportati nell'Eq. (5.6) nei seguenti:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= 1 & (5.7) \\
 C_2 &= -1 \\
 C_3 &= 1 \\
 C_4 &= 1
 \end{aligned}$$

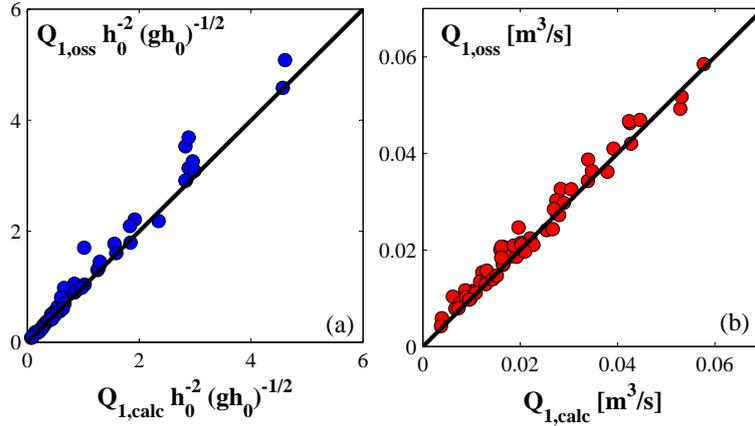


Figura 5.7: Confronto tra i valori sperimentali e previsti dall'Eq. (5.8) in termini adimensionali (a) e dimensionali (b).

cosicché l'Eq. (5.5) si può scrivere come:

$$\frac{Q_1}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}} = \left( \frac{Q_0}{h_0^2 \cdot \sqrt{gh_0}} \right) \cdot \left( \frac{B_1}{h_0} \right) \cdot \left( \frac{h_0}{B_0} \right) \cdot \left( 1 - \frac{d}{h_0} \right) \quad (5.8)$$

rappresentata graficamente dalla Fig. 5.7.

A mezzo di opportune semplificazioni, l'Eq. (5.8) può essere scritta come:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{B_1}{B_0} \cdot \left( 1 - \frac{d}{h_0} \right) \quad (5.9)$$

La rappresentazione grafica dell'Eq. (5.9) è presentata in Fig. 5.8; essa rappresenta in buona sostanza la scala di deflusso del manufatto, ovvero una relazione che esprime il rapporto di partizione note che siano le caratteristiche geometriche del partitore (larghezza  $B_1$  e distanza dal fondo  $d$ ), quelle del canale immissario (larghezza  $B_0$ ) e quelle della corrente veloce in arrivo (portata  $Q_0$  e tirante di moto uniforme  $h_0$ ). Viceversa, l'Eq. (5.9) può essere adoperata come criterio di progettazione del partitore, nota la portata in arrivo e stabilito il valore della portata da derivare.

### 5.1.2 Analisi energetica

È possibile pervenire all'Eq. (5.9) mediante un approccio fisicamente basato, facendo cioè riferimento alle leggi che regolano il deflusso di correnti a pelo libero.

Si consideri il carico totale  $H_0$  della corrente defluente nell'immissario, in condizioni di moto uniforme (ipotesi soddisfatta, nella sperimentazione, garantendo un lunghezza del canale sufficientemente grande a monte della partizione); esso è naturalmente pari alla somma del tirante idrico nella

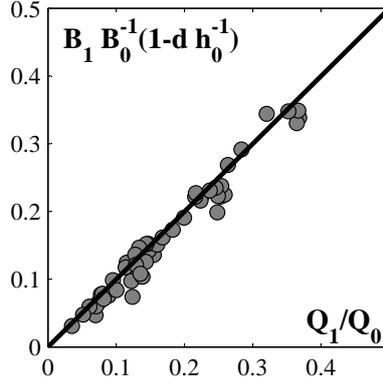


Figura 5.8: Scala di deflusso ricavata a mezzo dell'Eq. (5.9).

sezione di interesse, che ipotizziamo essere posizionata immediatamente a monte del partitore, e dell'altezza cinetica della corrente:

$$H_0 = h_0 + \frac{V_0^2}{2g} = h_0 + \frac{Q_0^2}{2g\sigma_0^2} \quad (5.10)$$

Similmente, il carico  $H_1$  della corrente defluente nel derivatore in una sezione immediatamente a valle del partitore, valutato rispetto al proprio fondo, è dato da:

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_1 + \frac{Q_1^2}{2g\sigma_1^2} \quad (5.11)$$

In analogia con Cozzo (1979, 1986) e Citrini (1982), nell'ipotesi di perdite di carico localizzate trascurabili si ha:

$$H_0 = H_1 + d \implies h_0 + \frac{Q_0^2}{2g\sigma_0^2} = h_1 + d + \frac{Q_1^2}{2g\sigma_1^2} = h_0 + \frac{Q_1^2}{2g\sigma_1^2} \quad (5.12)$$

che, operando le opportune semplificazioni, diventa:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad (5.13)$$

che esprime il rapporto di partizione come semplice rapporto tra le sezioni occupate dalla corrente nel canale immissario e nel partitore. Sostituendo le seguenti espressioni delle sezioni:

$$\sigma_0 = B_0 \cdot h_0 \quad (5.14)$$

$$\sigma_1 = B_1 \cdot h_1 \quad (5.15)$$

nell'Eq. (5.13) e ricordando la relazione tra i tiranti a mezzo della distanza dal fondo  $d$ , si ottiene:

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{B_1}{B_0} \cdot \left(1 - \frac{d}{h_0}\right) \quad (5.16)$$

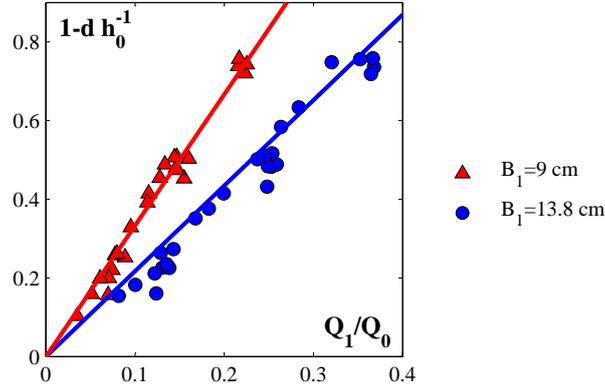


Figura 5.9: Scala di deflusso del partitore al variare della larghezza  $B_1$ .

che è esattamente coincidente con l'Eq. (5.9). Può essere utile rappresentare graficamente il rapporto di partizione espresso dall'Eq. (5.16) separatamente per le due larghezze sperimentate per il partitore, pari a 90 mm ( $B_1/B_0 = 0.30$ ) e 138 mm ( $B_1/B_0 = 0.46$ ). Come si nota dalla Fig. 5.9, i dati relativi alla larghezza maggiore presentano una maggiore dispersione, seppure non eccessiva, rispetto all'equazione della scala di deflusso: ciò è dovuto al fatto che il partitore, in questa configurazione, presenta una sagomatura dei setti di tipo circolare, cosa che causa un maggiore disturbo alla corrente derivata rispetto alla configurazione di larghezza minore, che presenta invece una sagomatura con lo spigolo vivo rivolto verso il basso, che accompagna i filetti fluidi in maniera più efficace.

La Fig. 5.10 rappresenta la scala di deflusso del manufatto descritta dall'Eq. (5.16) al variare di una serie di parametri, ed in particolare la larghezza  $B_1$  del partitore, la condizione interna di deflusso, il numero di Froude e la pendenza del canale immissario; tali variabili non mostrano una significativa influenza sul processo di partizione.

### 5.1.3 Adimensionalizzazione dei risultati

Si considerino i seguenti parametri adimensionali:

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{Q_1}{Q_0} & F^2 &= \frac{Q^2}{gB^2h^3} \\
 \beta &= \frac{B_1}{B_0} & \delta &= \frac{d}{h_0}
 \end{aligned}
 \tag{5.17}$$

L'Eq. (5.16) può dunque essere riscritta nella seguente forma:

$$q = \beta \cdot (1 - \delta) \tag{5.18}$$

mentre uno sviluppo alternativo dell'Eq. (5.12) conduce alla seguente espressione adimensionale, che mette in evidenza il numero di Froude della corrente

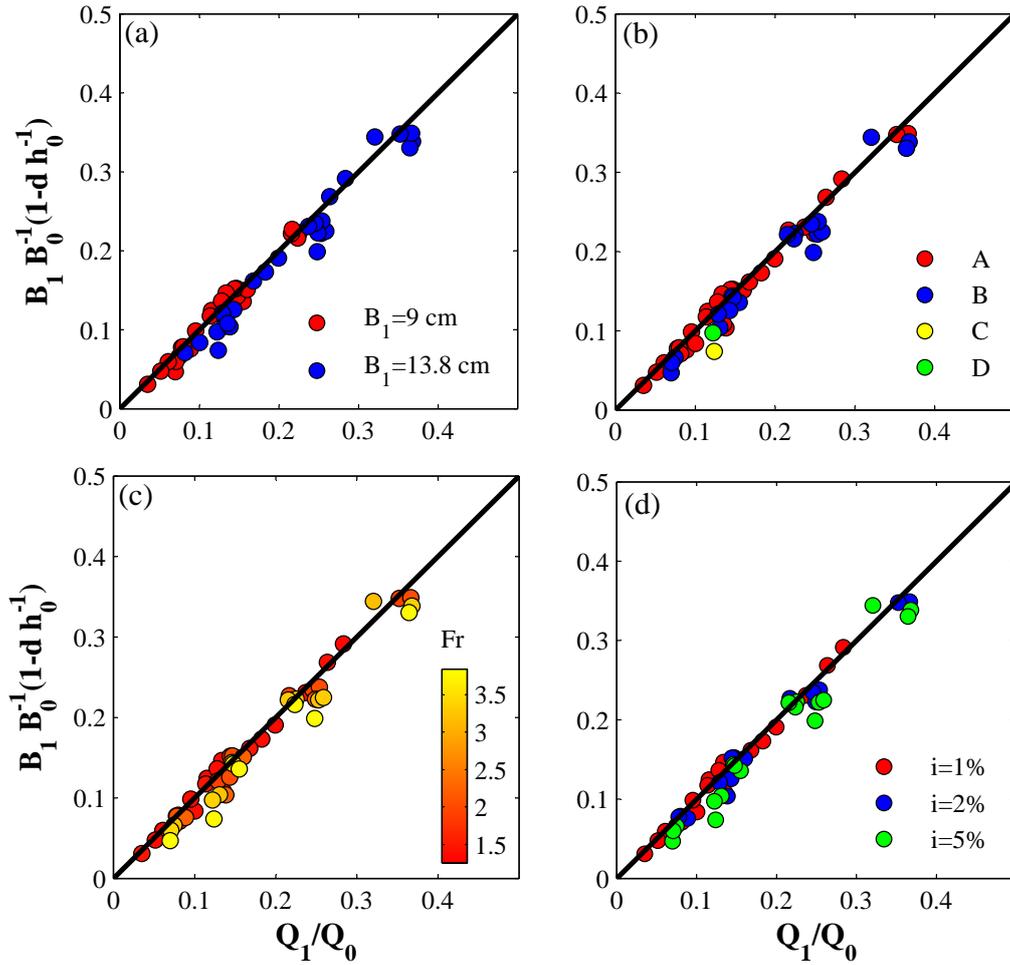


Figura 5.10: Scala di deflusso del partitore al variare della larghezza del manufatto (a), della condizione interna di deflusso (b), del numero di Froude (c) e della pendenza del canale immissario (d).

in arrivo:

$$\frac{H_1}{h_0} = 1 + \frac{F_0^2}{2} - \delta \quad (5.19)$$

L'Eq. (5.19) è mostrata in Fig. 5.11; per la maggioranza dei punti sperimentali l'allineamento alla bisettrice del primo e terzo quadrante è netto, indice del fatto che l'uguaglianza tra il primo e il secondo membro dell'Eq. (5.19) è rispettata; ciò non si verifica soltanto per alcuni punti, i quali corrispondono agli esperimenti effettuati con la larghezza minore del partitore ( $B_1 = 9$  cm) e la massima pendenza ( $i = 5\%$ ), dove invece si evidenzia una certa perdita di carico. La ragione di tale differenza non può essere cercata nella diversa sagomatura del fronte dei setti, poichè il setto orizzontale associato alla larghezza minore è provvisto di una sagomatura a spigolo vivo, che arreca un minore disturbo alla corrente rispetto a quella cilindrica, propria invece del

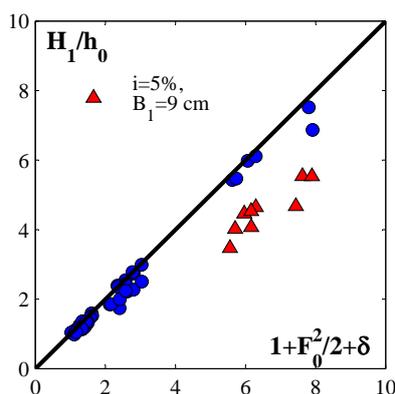


Figura 5.11: Scala di deflusso adimensionalizzata del partitore secondo l'Eq. (5.19); in evidenza i punti sperimentali relativi alla condizione  $i = 5\%$  e  $B_1 = 9$  cm.

setto associato alla larghezza maggiore, che non mostra significative perdite di carico.

## 5.2 Perdite di carico

L'intera trattazione finora condotta si basa, con successo, sull'ipotesi ereditata dallo stato dell'arte di perdite di carico localizzate trascurabili. Ciò consente di poter scrivere, come è stato fatto,  $H_0 = H_1 + d$  essendo  $H_0$  il carico idraulico totale della corrente in arrivo al sistema, e  $H_1$  il carico della corrente defluente nel partitore, entrambi valutati con riferimento al fondo rispettivamente del canale principale e del canale derivatore, in condizioni di moto graduale.

Essendo possibile valutare separatamente i carichi a mezzo dei dati sperimentali, si è proceduto alla verifica dell'ipotesi di trascurabilità delle perdite di carico, illustrata in Fig. 5.12. La figura (a) mostra che l'ipotesi di perfetta uguaglianza non è verificata solo per quei punti già evidenziati in Fig. 5.11 e caratterizzati da  $B_1 = 9$  cm e  $i = 5\%$ , per i quali si può ipotizzare una perdita di carico localizzata del tipo  $\Delta H = \alpha \cdot V^2 / (2g)$  con  $\alpha = 0.33$ , valore che rende valida l'uguaglianza  $H_0 = H_1 + d$  come osservabile in Fig. 5.12(a).

La Fig. 5.12(b) mostra invece il confronto tra il carico idraulico totale nel canale immissario e quello dell'emissario; essendo i due canali caratterizzati dalla stessa quota del fondo, è rispettata l'uguaglianza  $H_0 = H_2$  senza alcuna influenza nè della larghezza del partitore, nè della pendenza, nè della condizione esterna di deflusso, che peraltro è risultata nel corso della sperimentazione sempre costante, con una vena sempre distaccata sia dalla parete sinistra che dal fondo del partitore.

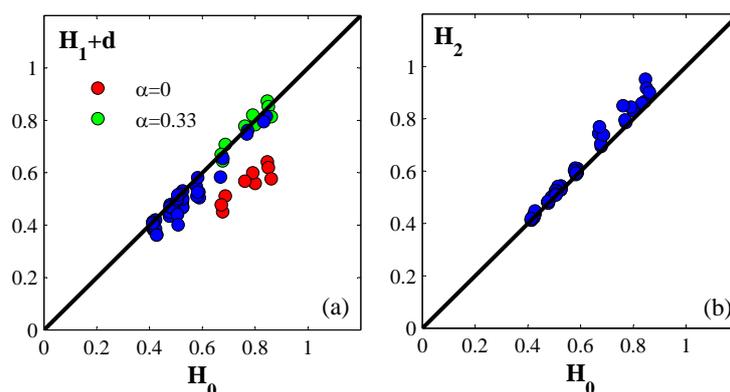


Figura 5.12: Confronto tra il carico idraulico totale della corrente in arrivo e di quella defluente nel partitore (a) e nell'emissario (b); in evidenza i punti con  $i = 5\%$  e  $B_1 = 9$  cm.

### 5.3 Profilo di velocità

Per ottenere informazioni circa l'andamento delle velocità nel canale principale a monte della partizione, sono state effettuate misure locali mediante un tubo di Pitot. In Fig. 5.13 è riportata la griglia di misura, costituita da quattro verticali a distanza diversa dalla parete in sinistra idraulica del canale e dodici orizzontali a diversa distanza dal fondo; come si può notare, le misure risultano più fitte in prossimità delle pareti, dove sono attese variazioni più rapide, e più rade al centro del canale, dove ci si aspetta che si verifichino i valori massimi della velocità. Tutte le misure fanno riferimento ad una portata in ingresso all'impianto pari a 92.6 l/s, una pendenza pari al 5% e un tirante  $h_A$  nella sezione di misura pari a 90.4 mm. In Fig. 5.14 è mostrato l'andamento delle velocità lungo le quattro verticali di misura; imponendo un valore pari a zero sul fondo, è evidente che la velocità è significativamente diversa da zero già a poca distanza dal fondo. Allo stesso modo, la Fig. 5.15 mostra l'andamento delle velocità lungo le linee orizzontali della griglia di misura; imponendo un valore pari a zero alla parete, i valori sono comunque significativi già a poca distanza dalla parete.

Nell'ipotesi di simmetria, ovvero che le misure relative alla porzione in sinistra idraulica del canale principale si ripetano identicamente nella porzione di destra, e ipotizzando un valore pari a 0 della velocità in corrispondenza del fondo e delle pareti del canale, è possibile ottenere l'andamento delle velocità nella sezione idrica (Fig. 5.16) una volta scelto un opportuno metodo di interpolazione, che nel caso in esame è il metodo della triangolazione con interpolazione lineare. La Fig. 5.16 mostra in modo particolarmente evidente la zona in cui i gradienti di velocità assumono valori molto elevati; per le pareti laterali tale spessore è pari ad appena 1.5 cm circa, mentre è ancora più esiguo per il fondo del canale. La Fig. 5.17 ne mostra la corrispondente

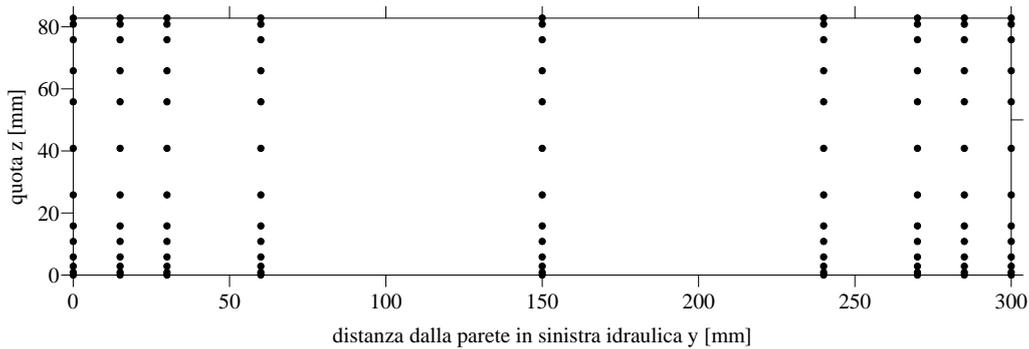


Figura 5.13: Griglia di misura delle velocità nell'ipotesi di simmetria del profilo.

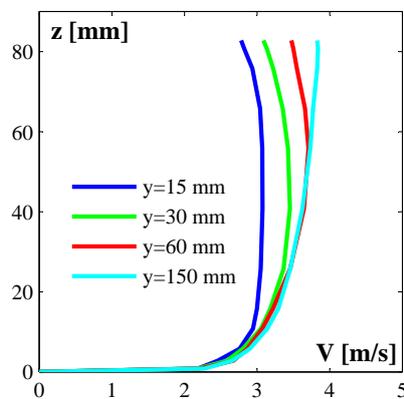


Figura 5.14: Andamento della velocità lungo le verticali di misura.

rappresentazione in tre dimensioni ovvero il “solido delle velocità”; il volume sotteso alla superficie risulta pari a 79 l/s, corrispondente all'85% della portata inviata. Tale approssimazione è da considerarsi lecita visto l'esiguo numero di punti di misura, ed in particolare vista la spaziatura delle verticali di misura.

Si noti che il rapporto di partizione dell'Eq. (5.18) può essere interpretato come rapporto tra i volumi sottesi ai solidi della velocità della sezione principale (Fig. 5.17) e della sezione del derivatore. L'aver dimostrato che lo strato limite, ovvero lo spessore prossimo alle pareti all'interno del quale i gradienti di velocità variano con maggiore rapidità, ha uno spessore estremamente esiguo giustifica il risultato sperimentale ottenuto, per il quale tale rapporto si riduce al semplice rapporto tra le ampiezze delle sezioni idriche.

## 5.4 Stato critico

Nel caso dei partitori frontali, come visto nello stato dell'arte, le dimensioni del derivatore hanno un effetto limitatore sulla portata derivata, cosicché

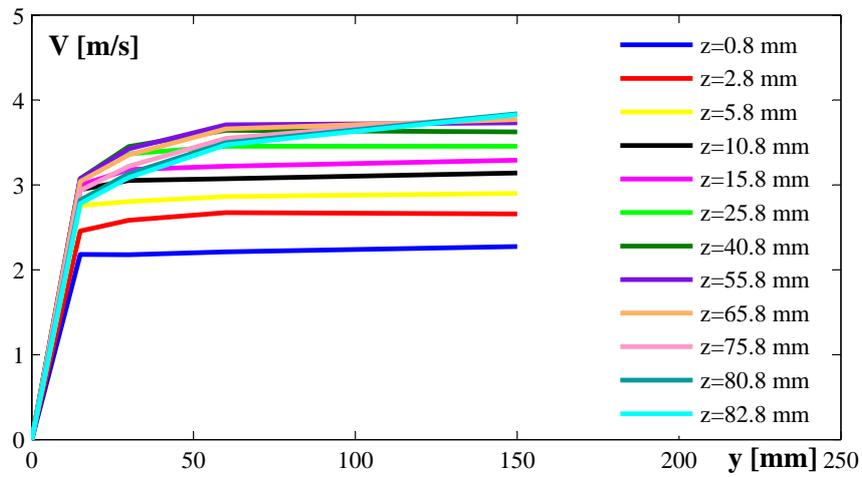


Figura 5.15: Andamento della velocità lungo le orizzontali di misura.

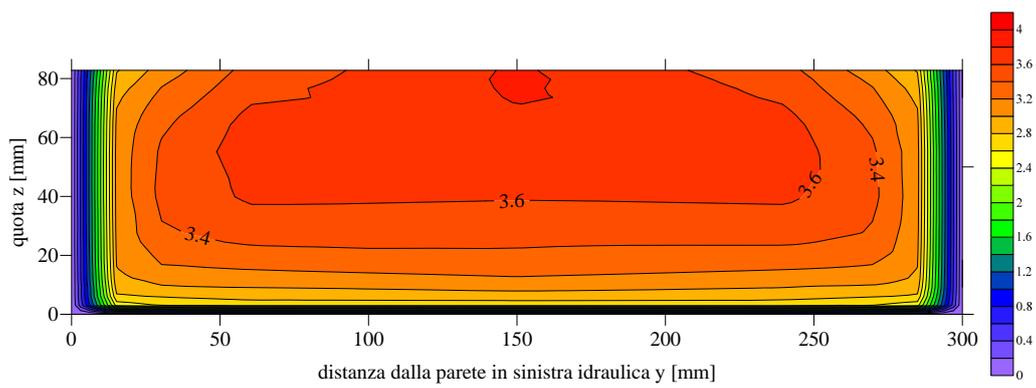


Figura 5.16: Andamento spaziale della velocità nella sezione di misura.

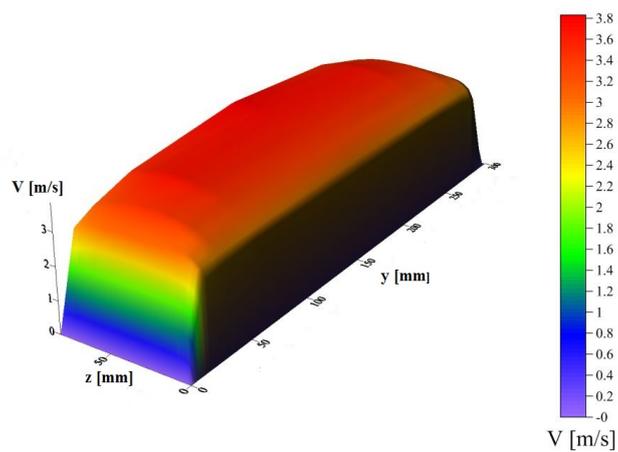


Figura 5.17: Solido delle velocità.

l'efficienza del manufatto è in genere soddisfacente poiché la portata derivata non può superare di troppo il valore di progetto. Nel caso del partitore semi-frontale, invece, la portata derivata scorre al di sopra del setto orizzontale e pertanto non è fisicamente confinata nella parte superiore. Tuttavia, le relazioni sperimentali che descrivono il comportamento del manufatto oggetto di studio sono valide fintantoché sia garantita la condizione di corrente derivata veloce. La massima portata ammissibile che può defluire nel derivatore è quindi la portata di stato critico  $Q_c$ , che rappresenta il limite superiore di funzionamento del partitore semi-frontale.

Si consideri innanzitutto la relazione intercorrente tra il tirante e la portata defluente in un alveo cilindrico a sezione rettangolare di larghezza  $B$ , desumibile ponendo pari a 1 il numero di Froude:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 g}} \quad (5.20)$$

Il carico totale della corrente sarà dunque:

$$H_c = h_c + \frac{Q^2}{2gB^2 h_c^2} = h_c + \frac{Q^{2/3}}{2g^{1/3} B^{2/3}} = h_c + \frac{h_c}{2} = \frac{3}{2} h_c \quad (5.21)$$

la cui formulazione inversa è:

$$h_c = \frac{2}{3} H_c \quad (5.22)$$

Applicando tale relazione nella sezione del derivatore immediatamente a valle della partizione si ottiene:

$$h_{c,1} = \frac{2}{3} H_{c,1} = \left( \frac{Q_{c,1}^2}{g B_1^2} \right)^{1/3} \quad (5.23)$$

da cui si ottiene l'espressione della portata critica:

$$Q_{c,1} = B_1 \left[ g \left( \frac{2}{3} H_1 \right)^3 \right]^{1/2} \quad (5.24)$$

Ricordando l'Eq. (5.19) la portata critica può anche essere espressa dalla seguente:

$$Q_{c,1} = B_1 \sqrt{g \left[ \frac{2}{3} h_0 \left( 1 + \frac{F_0^2}{2} - \delta \right) \right]^3} \quad (5.25)$$

La Fig. 5.18(a) mostra il rapporto tra la portata derivata e quella corrispondente allo stato critico nel partitore in funzione della distanza relativa  $\delta$  del setto orizzontale dal fondo e del numero di Froude  $F_0$  della corrente in arrivo al manufatto. Appare evidente che l'insorgere dello stato critico

Tabella 5.1: Valori sperimentali dei coefficienti  $m$  e  $n$ .

$F_0$ medio	$m$	$n$
1.41	-0.8844	1.1384
2.05	-0.6844	0.7984
3.46	-0.3274	0.3716

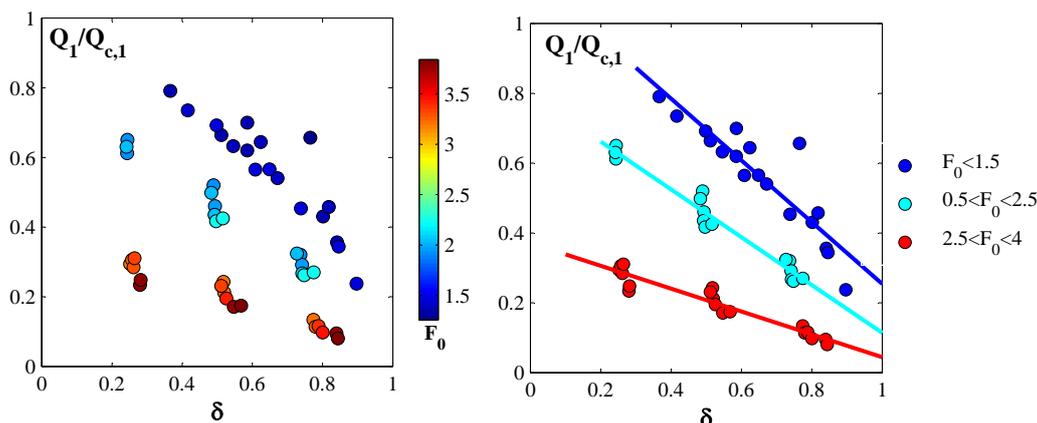


Figura 5.18: Relazione tra la portata derivata, adimensionalizzata rispetto alla portata di stato critico, e la distanza adimensionale dal fondo  $\delta$ , al variare del numero di Froude della corrente in arrivo, variabile con continuità (a) e suddiviso in classi (b).

può essere determinato sia da una diminuzione del numero di Froude della corrente in arrivo sia, a parità di condizioni di deflusso della corrente in ingresso, al diminuire della distanza relativa; in particolare, all'aumentare del numero di Froude della corrente in arrivo, purché maggiore di 1, l'influenza della distanza relativa del setto orizzontale dal fondo diminuisce. La Fig. 5.18(b), che presenta una suddivisione arbitraria dei  $F_0$  sperimentali in tre classi, permette di apprezzare la dipendenza pressoché lineare della portata critica adimensionale da  $\delta$ : per le tre classi, il legame funzionale può essere rappresentato da una retta di equazione  $\frac{Q_1}{Q_{c,1}} = m \cdot \delta + n$  con i valori dei coefficienti  $m$  e  $n$  elencati in Tab. 5.1.

La Fig. 5.19 mostra come entrambi i coefficienti dipendano fortemente dal numero di Froude medio di ogni classe; in particolare, supponendo una dipendenza lineare,  $m$  si annulla per  $F_0$  medio pari a 4.7, cosicché si può supporre con ragionevole approssimazione che già per numeri di Froude della corrente in arrivo pari a 4–5 il rapporto  $Q_1/Q_{c,1}$  non dipenda più da  $\delta$  e che dunque il raggiungimento dello stato critico nel derivatore sia di fatto impossibile. Tale condizione è comunque preceduta dalla condizione  $n \leq 1$ , che si verifica per  $F_0 \geq 1.7$  circa: in corrispondenza dell'uguaglianza la retta nel piano  $\delta, Q_1/Q_{c,1}$  interseca l'asse delle ordinate per  $Q_1/Q_{c,1} = 1$ , di

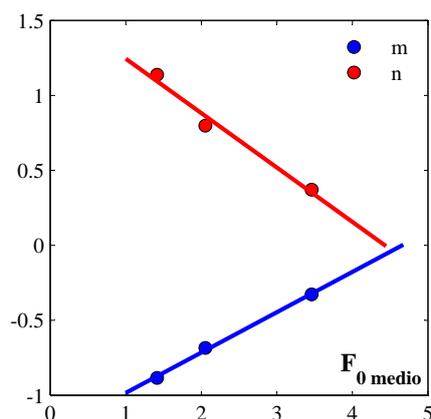


Figura 5.19: Relazione tra i coefficienti della relazione  $\frac{Q_1}{Q_{c,1}} = m \cdot \delta + n$  e il numero di Froude della corrente in arrivo.

conseguenza per  $F_0 > 1.7$  tale rapporto non potrà mai attingere il valore 1 qualunque sia il valore assunto da  $\delta$ .

## 5.5 Efficienza del partitore

Come discusso nell'introduzione, un manufatto di partizione è efficace se, all'aumentare della portata in arrivo al sistema, la portata derivata non supera di troppo un prefissato valore. Ciò è coerente con la finalità tipica di un partitore, cioè quella di convogliare l'aliquota minore della corrente ad un impianto di depurazione progettato con riferimento ad una determinata portata, che dovrà pervenire all'impianto in occasione di eventi meteorici di entità diversa. Nella specifica circostanza oggetto di studio, la portata derivata non viene convogliata verso l'impianto di depurazione ma più semplicemente in un collettore secondario di dimensioni modeste rispetto al canale principale; è dunque necessario garantire in tale collettore un grado di riempimento non eccessivo, per evitare problemi di *choking* nel ramo stesso e di rigurgito nei collettori di monte.

A rigore, la valutazione dell'efficienza andrebbe effettuata valutando, sperimentalmente o analiticamente, la variazione della portata derivata  $Q_1$  al variare della portata in arrivo al sistema  $Q_0$ . In una rappresentazione grafica che presenti sulle ascisse  $Q_0$  e sulle ordinate  $Q_1$ , la condizione di canale indisturbato è fornita dalla bisettrice del primo e terzo quadrante. Allorquando, nel caso di un partitore a luce frontale, il tirante  $h_0$  supera l'altezza del setto orizzontale, inizia il processo di partizione, rappresentato da curve pseudo-orizzontali diverse a seconda del valore dell'altezza del setto. L'efficacia è garantita dal fatto che la portata derivata risulta limitata superiormente

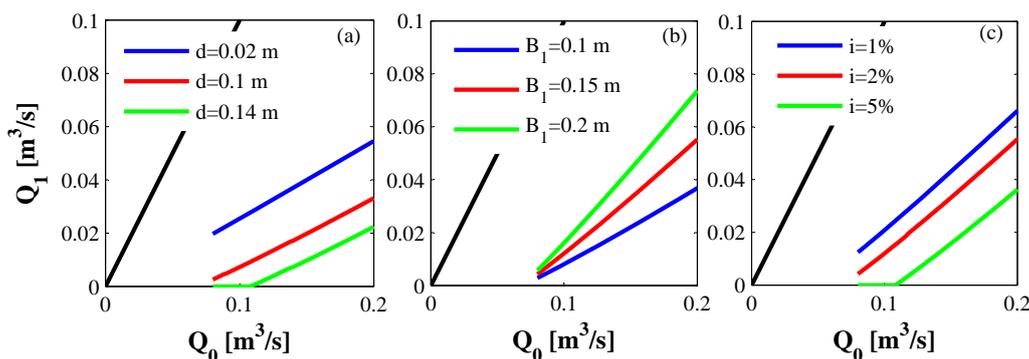


Figura 5.20: Efficienza del partitore al variare di  $d$  (a), di  $B_1$  (b) e di  $i$  (c)

dall'altezza del setto, e in misura ancora maggiore quando la vena inferiore risulta ben areata, cosicché non si sviluppino depressioni.

A differenza del partitore frontale, il funzionamento del partitore semi-frontale non è fisicamente limitato da nessun parametro geometrico, pertanto le curve crescono indefinitamente all'aumentare della portata in arrivo. Naturalmente, per quanto detto al paragrafo precedente la portata massima defluente nel derivatore non deve comunque superare il valore critico  $Q_{c,1}$ . A titolo di esempio si riportano nel grafico di Fig. 5.20(a) le curve dell'efficienza relative ad un partitore semi-frontale di larghezza  $B_1$  pari a 9 cm al variare della distanza  $d$  del setto orizzontale dal fondo, con una pendenza dell'immissario pari al 2%; in Fig. 5.20(b) sono riportate le curve relative ad un manufatto caratterizzato da  $d = 10$  cm al variare di  $B_1$ , con pendenza dell'immissario pari al 2%; infine, in Fig. 5.20(c) sono riportate le curve dell'efficienza per un partitore semi-frontale con  $B_1 = 15$  cm e  $d = 10$  cm, al variare della pendenza. È evidente che, a parità degli altri parametri, l'efficienza non dipende né dalla distanza  $d$  del setto orizzontale dal fondo né dalla pendenza, poiché le curve in Fig. 5.20(a) e (c) sono sostanzialmente parallele tra loro; l'efficienza risulta invece dipendere dalla larghezza del partitore, ed in particolare aumenta al diminuire di  $B_1$  (le curve sono infatti sempre meno pendenti al diminuire di  $B_1$ ).

Si noti che le curve in Fig. 5.20 sono state ottenute a mezzo dell'Eq. (5.9), all'interno della quale il tirante di moto uniforme  $h_0$  è stato valutato tramite la formula di Gauckler e Strickler, tarando l'indice di scabrezza  $K_{STR}$  con i dati della sperimentazione. La taratura ha fornito  $K_{STR} = 105 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ; la Fig. 5.21 mostra le scale di deflusso di moto uniforme relative alle tre pendenze sperimentate.

Infine, è possibile notare che, mentre nel partitore frontale la portata in ingresso coincide con la portata derivata fino alla condizione *tirante > altezza della soglia*, nel partitore frontale la stessa condizione garantisce  $Q_1 = 0$ , come è possibile notare in Fig. 5.20(a) per la curva relativa a  $d = 0.14$  m e

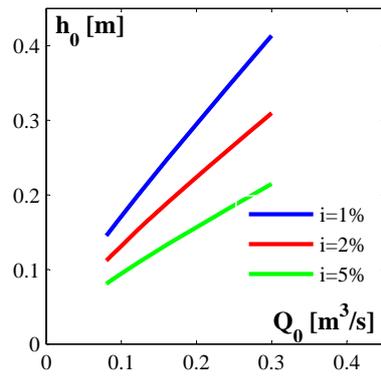


Figura 5.21: Scale di deflusso di moto uniforme del canale immissario, al variare di  $i$ .

in Fig. 5.20(c) per la curva relativa alla condizione  $i = 5\%$ .

## Conclusioni

“Che peccato che debba finire  
così tra noi due [...] Dove  
troverò un nuovo avversario che  
riesca a stare al mio livello?”  
“Perché non prova in qualche  
fogna?”

---

*Indiana Jones – I Predatori  
dell’Arca Perduta, 1981*

La sperimentazione descritta è stata condotta al fine di caratterizzare dal punto di vista idraulico un manufatto di partizione innovativo ispirato al modello di partitore frontale e per questo denominato “partitore semi-frontale”. Tale manufatto è costituito da un setto orizzontale e uno verticale che vanno a delineare, all’interno del canale principale, un canale secondario in grado di allontanare dal tratto fognario interessato un’aliquota della portata. Questo genere di scaricatore di piena è particolarmente utile in condizione di corrente veloce, dove manufatti più compiutamente caratterizzati come gli scaricatori laterali possono creare problemi di risalito lungo la soglia, e quando il canale in cui si intende convogliare la portata derivata si trova alla stessa quota del canale principale, condizioni in cui non è possibile impiegare uno scaricatore a salto.

La sperimentazione è stata condotta con riferimento ad un’intersezione del sistema fognario di Via Tasso, nella città di Napoli, che è stata individuata come nodo adatto a posizionare il manufatto di partizione in oggetto per allontanare un’aliquota della portata di piena al fine di alleggerire il sistema di valle, in cui il funzionamento di alcuni manufatti idraulici è inficiato da valori elevati di portata. Nel punto in esame lo speco fognario ha sezione rettangolare con larghezza  $B_0$  pari a 2 m e altezza  $a$  pari a 2.5 m, con una pendenza pari al 5%; grazie alle attrezzature a disposizione nel Laborato-

rio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università Federico II di Napoli è stato possibile realizzarne un modello con rapporto di scala delle lunghezze pari a 0.15 in similitudine di Froude. Il modello, interamente in Plexiglas, consente di variare la pendenza  $i$  del canale principale e larghezza  $B_1$  e distanza dal fondo  $d$  del canale derivatore, aderente alla parete in destra idraulica del canale principale. Il sistema è inoltre corredato di strumenti per la misura dei tiranti e della portata in ingresso e derivata.

La sperimentazione ha condotto alla determinazione della scala di deflusso del partitore semi-frontale, ovvero di una relazione che colleghi la portata derivata con le caratteristiche geometriche del manufatto e con il valore della portata in ingresso nel sistema:

$$q = \beta \cdot (1 - \delta) \quad (6.1)$$

dove  $q$  è il rapporto tra la portata derivata  $Q_1$  e la portata in arrivo  $Q_0$ ,  $\beta$  è il rapporto tra la larghezza del partitore  $B_1$  e la larghezza del canale principale  $B_0$ , e  $\delta$  è il rapporto tra la distanza  $d$  del fondo del partitore dal fondo del canale principale e il tirante  $h_0$  della corrente in arrivo. L'Eq. (6.1) si basa su alcune ipotesi semplificative, validate sia dall'evidenza sperimentale che da studi precedenti, ed in particolare:

- moto permanente e distribuzione idrostatica delle pressioni nella sezione idrica;
- perdite di carico localizzate di imbocco trascurabili;
- coefficiente di ragguaglio delle velocità pari a 1;
- compensazione tra le perdite di carico distribuite e la pendenza del canale.

L'Eq.(6.1) può dunque essere adoperata come criterio di progettazione di un partitore semi-frontale: fissato un tempo di ritorno di progetto e noto dunque il valore sia della portata che del tirante in ingresso, si sceglieranno i valori congiunti di  $B_1$  e  $d$  tali da derivare la portata richiesta  $Q_1$ . Nella scelta delle variabili geometriche si dovrà comunque tener conto sia di accorgimenti idraulici, evitando valori troppo piccoli di  $\delta$ , che possono far insorgere problemi di rigurgito, sia di accorgimenti tecnici, evitando di creare nel canale spazi troppo angusti, di facile ostruzione e difficile ispezione. In particolare, si raccomandano valori sia di  $B_1$  che di  $d$  non minori di 60 cm e un valore del raggio di curvatura del derivatore, a valle dell'imbocco del manufatto, almeno pari a  $3B_1$  (Marchi, 1988). Nel campo di variabilità dei dati sperimentali (Tab. 4.1) si dovrà garantire che  $\delta$  sia compreso tra 0.3 e 0.8 per evitare problemi di rigurgito a monte.

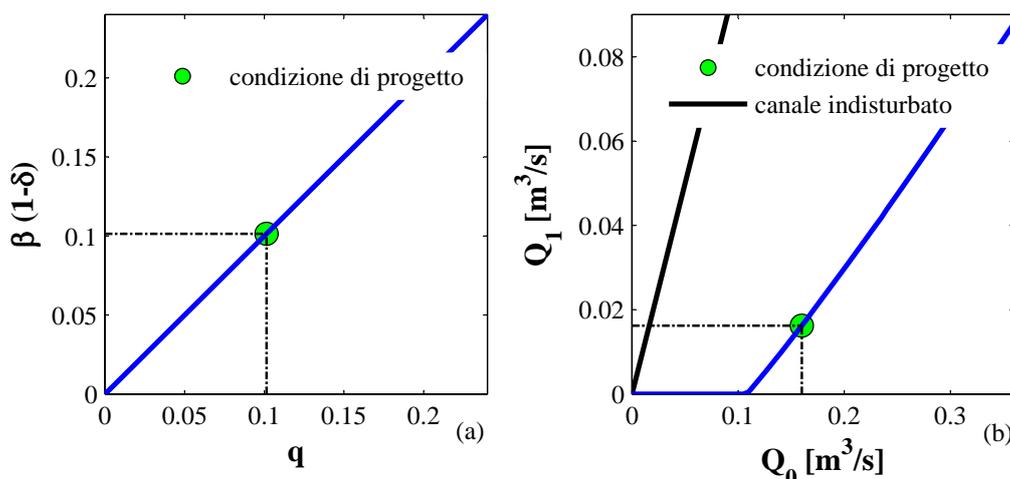


Figura 6.1: Scala di deflusso (a) ed efficienza (b) del partitore semi-frontale per le dimensioni di progetto; in evidenza la condizione di progetto e quella di stato critico.

Applicando tali considerazioni all'intersezione in esame, si intende derivare una portata di circa  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  ripartita su almeno due nodi, quindi  $Q_1 = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  con  $Q_0 = 18.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , corrispondenti rispettivamente a  $13 \text{ l/s}$  e  $159 \text{ l/s}$  nel modello. Si suggerisce un valore di  $d$  pari a  $67 \text{ cm}$  e un valore di  $B_1$  pari a  $82 \text{ cm}$ , rispettivamente pari a  $10 \text{ cm}$  e  $12.3 \text{ cm}$  nel modello; si ha dunque  $\beta = 0.41$ . In Tab. 6.1 sono sintetizzate le caratteristiche geometriche del manufatto, nonché il valore di portata che è necessario derivare attesa la portata trentennale nella Nuova Collettrice di Via Tasso. In Tab. 6.2 sono invece riportate le caratteristiche del deflusso nell'immissario e nel partitore per le dimensioni assegnate e supponendo una portata in ingresso al sistema pari al valore trentennale  $Q_0$  riportato in Tab. 6.1; si ricordano in particolare la portata  $Q_1$  effettivamente derivata con il rispettivo tirante  $h_1$ , i valori di  $\delta$  e  $q$  pari rispettivamente a  $0.75$  e  $0.1$  circa, il grado di riempimento  $y$  nel derivatore e il rapporto di scolmamento  $R$ . Come prescritto dalla letteratura, il rapporto di scolmamento assume un valore molto elevato; si nota invece che il grado di riempimento tanto nell'immissario quanto nel derivatore è ampiamente compatibile con i valori usuali.

In Fig. 6.1 sono rappresentate la scala di deflusso del partitore semi-frontale (a) e la sua efficienza (b) al variare della portata in ingresso; in entrambi i casi è messo in evidenza il punto corrispondente alla portata in ingresso di progetto, caratterizzato da  $q = 0.1$  e  $\delta = 0.75$ . Per avere un'idea dell'efficienza del manufatto, si noti che, per una portata  $Q_0$  in ingresso pari al doppio di quella di progetto, viene derivata una portata  $Q_1$  pari a 4 volte quella di progetto ( $\eta = 4.05$ ); tale valore risulta del tutto compatibile con i valori tipici di altre tipologie di scaricatori, quali quelli a salto, e appena

peggiore rispetto ai valori riscontrati nelle prove sperimentali di Cozzo (1979, 1986) per i partitori frontali.

Per quanto concerne infine lo stato critico, il numero di Froude della corrente defluente nell'immissario è pari a 3.5, molto maggiore dunque di 1.7, valore oltre il quale la sperimentazione suggerisce che non si possa di fatto raggiungere lo stato critico. Infatti, nelle condizioni di progetto il rapporto  $Q_1/Q_{c,1}$  è pari a 0.1 circa, molto lontano dall'unità; il Froude della corrente defluente nel partitore si dimostra molto superiore all'unità, e precisamente pari a 7.1.

Tabella 6.1: Caratteristiche geometriche del partitore semi-frontale e valori teorici di portata.

	modello	prototipo
$B_0$ [m]	0.3	2
$a$ [m]	0.375	2.5
$i$ [%]	5	5
$d$ [m]	0.1	0.67
$B_1$ [m]	0.123	0.82
$\beta$	0.41	0.41
$Q_0$ [m <sup>3</sup> /s]	0.159	18.3
$h_0$ [m]	0.133	0.885
$F_0$	3.5	3.5
$Q_1$ [m <sup>3</sup> /s]	0.013	1.5
$y_{immissario}$ [%]	35	35

Tabella 6.2: Valori caratteristici del partitore semi-frontale in condizioni di progetto.

	modello	prototipo
$Q_1$ [m <sup>3</sup> /s]	0.0162	1.865
$h_1$ [m]	0.0328	0.219
$F_1$	7.1	7.1
$\delta$	0.753	0.753
$q$	0.101	0.101
$y_{derivatore}$ [%]	12	12
$R$ [%]	90	90

I risultati relativi alla sperimentazione sul partitore semi-frontale sono pubblicati in Del Giudice *e altri* (2013), dove il manufatto è indicato con l'acronimo di "FRIDS" ovvero *Frontal Rectangular Intake Diversion Structure*.

## Parte II

### Il pozzo di caduta

# Capitolo 7

## Introduzione

Il mondo vivrebbe molto più facilmente senza libri che senza fogne. E ci sono posti sulla terra dove ce ne sono pochi degli uni e poche delle altre. Io naturalmente preferirei vivere senza fogne, ma io sono malato.

---

Charles Bukowski  
(*Il capitano è fuori a pranzo*,  
1998)

Nell'ambito delle reti di drenaggio urbano, normalmente l'andamento altimetrico dei collettori tende a rispecchiare la topografia locale. Tuttavia, quando il centro urbano è caratterizzato da notevoli variazioni altimetriche, come nel caso della città di Napoli che presenta rilievi in prossimità della costa, ciò comporterebbe una pendenza troppo elevata dei collettori, con importanti conseguenze in termini sia idraulici che di usura dei materiali. Quando ciò accade l'accorgimento tecnico usuale è quello di prevedere dei *manufatti di salto*, tramite i quali è possibile raccordare più collettori disposti con pendenze moderate.

Tra i tipi più comuni di manufatti di salto in fognatura si ricordano (Hager, 2010):

- i pozzetti di salto, costituiti da scatolari adibiti all'ispezione e manutenzione, spesso in successione per suddividere il dislivello totale in più salti di modesta entità;
- i pozzi a vortice, costituiti da condotti verticali raccordati in modo peculiare sia con lo speco in ingresso che con quello di uscita.

I primi normalmente vengono impiegati per salti modesti (in genere  $\leq 7$  m), e possono essere usati per correnti in arrivo sia lente che veloci; normalmente, una corrente lenta in uscita dal manufatto costituisce l'unico accorgimento per la dissipazione dell'energia. I pozzetti, comunque, presentano delle problematiche legate alla creazione di una miscela acqua-aria, che abbatta la *performance* idraulica del manufatto determinando l'insorgere di un fenomeno pulsante appunto legato all'assenza di un'adeguata ventilazione; ancora, spesso l'inquinamento acustico è eccessivo, cosa che può inficiare l'utilizzo di tali manufatti in zone abitate (Hager, 2010).

I pozzi a vortice vengono invece impiegati per superare, con un unico salto, dislivelli di almeno 5-10 m; in essi, la corrente in arrivo (che deve essere completamente lenta o completamente veloce) viene immessa nel pozzo verticale tramite una camera a spirale, che imprime al getto un moto elicoidale. Le particolari condizioni di deflusso fanno sì che la corrente assuma una forma anulare, al centro della quale è presente un nucleo centrale di aria; di conseguenza, la corrente perde gran parte della sua energia per attrito con le pareti, risultando, all'uscita dal manufatto, tipicamente in condizioni subcritiche. Inoltre, la netta separazione tra il flusso d'aria e quello di acqua evita le pericolose conseguenze di una inadeguata ventilazione del fluido. Ad ogni modo, i pozzi a vortice sono consigliati solo quando lo specifico ambito di applicazione non consente l'utilizzo dei pozzetti (Hager, 2010).

Come appena detto, la presenza di un particolare imbocco rende il pozzo verticale un manufatto largamente impiegato nelle reti di drenaggio urbano, ed in particolare in quella di Napoli, per la quale sono disponibili molteplici sperimentazioni (Del Giudice *e altri*, 2010; Del Giudice e Gisonni, 2011). Più in generale, la struttura base di un pozzo consta di tre parti: un imbocco, una canna verticale, un sistema di ventilazione. L'imbocco deve consentire una transizione graduale dalla condizione di flusso orizzontale a verticale; sono disponibili in letteratura vari esempi, tra cui il già menzionato imbocco "a vortice", l'imbocco "a calice" e quello "a spigolo vivo" (Williams, 1997) (Fig. 7.1). La canna verticale convoglia il flusso verso la base del pozzo, dove è in genere previsto un sistema di dissipazione dell'energia sotto forma di cuscini d'acqua o risalti idraulici artificialmente indotti, a seconda dell'entità del salto.

Così come per l'imbocco a vortice, anche quello a calice (*morning glory* nella letteratura tecnica straniera) è ampiamente trattato, anche se, a differenza del primo, che trova impiego soprattutto in fognatura, il secondo trova largo impiego come imbocco di scarichi di superficie di invasi artificiali. La progettazione degli scarichi è un problema di fondamentale importanza, poiché le opere di sbarramento, e soprattutto le dighe in terra, possono essere notevolmente danneggiate, se non addirittura distrutte, dalla tracimazione delle acque; quando si prevede uno scarico sottoforma di tunnel, il suo dimensionamento, e la conseguente scelta del tipo di imbocco, è dunque un

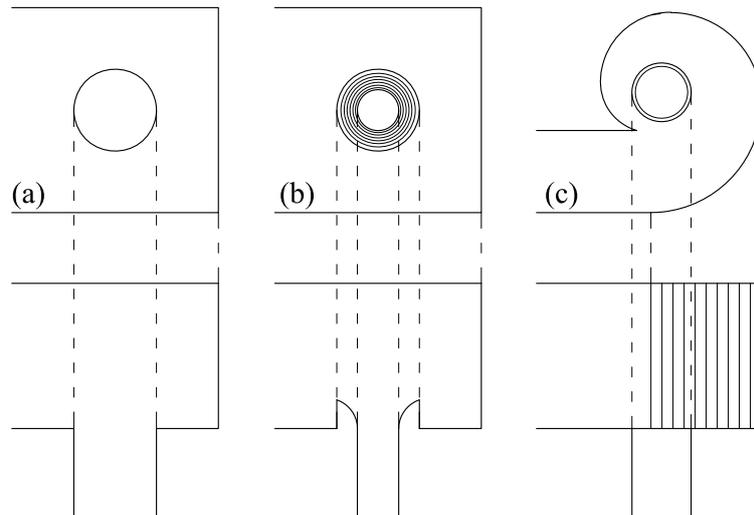


Figura 7.1: Tipi di imbocco: a spigolo vivo (a), a calice (b), a vortice (c).

aspetto cruciale (USBR, 1987).

Una delle problematiche relative al funzionamento di un qualsiasi pozzo risiede nella natura del flusso, che è formato da una miscela di aria e acqua in composizioni diverse; di conseguenza, notevole importanza riveste il controllo dell'intrappolamento d'aria, soprattutto per elevate variazioni di quota. Se il pozzo presenta un funzionamento in pressione, per tutta la sua lunghezza o solo per una parte, e non viene garantita la presenza di aria nel getto, può stabilirsi un funzionamento in depressione con conseguenti problemi di cavitazione, che potrebbero danneggiare il pozzo stesso e gli eventuali dispositivi idraulici annessi, quali pompe o turbine. Inoltre, se non viene garantito un sistema di ricircolo o di deaerazione, essa tenderà a salire verso l'alto anche violentemente, innescando fenomeni che al livello più violento vengono definiti di *geysering* (Rajaratnam e altri, 1997). Tali problemi possono chiaramente essere evitati garantendo un adeguato sistema di ventilazione, che può essere ad esempio previsto lungo la canna verticale (Guo e Song, 1988) o allo sbocco della stessa nel canale ricevente (Williams, 1997). Il vantaggio dell'imbocco a calice sta proprio nel fatto che il suo impiego neutralizza l'instaurarsi di depressioni lungo il pozzo, poiché la sua forma va sagomata in relazione alla forma assunta dal getto, che si presenta in forma anulare con un moto prevalentemente verticale.

Generalmente, i pozzi sono progettati per funzionare stabilmente a pressione atmosferica o in pressione per tutta la loro lunghezza. Tuttavia, nel caso di fognature miste, le portate e i tiranti possono variare notevolmente, a seconda dell'entità dell'evento meteorico, sia in corrispondenza dell'imbocco che nel canale ricevente (Viparelli, 1961); la variabilità delle condizioni al contorno determina l'insorgere di diverse modalità di funzionamento del

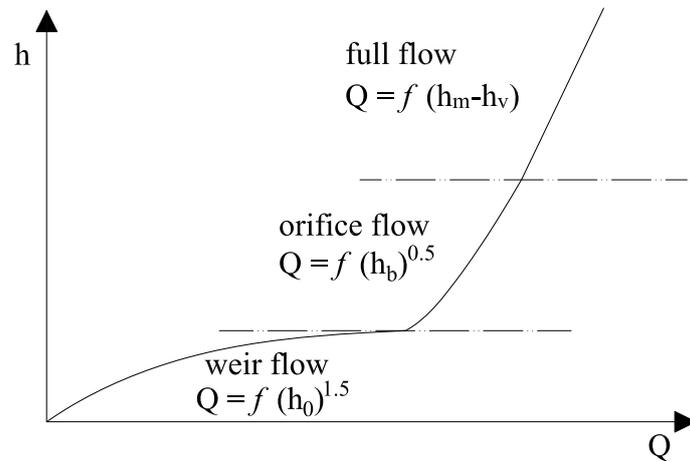


Figura 7.2: Scala di deflusso di un pozzo di caduta ( $h_0$  è il carico sullo stramazzo quando vige il *weir flow*,  $h_b$  è il carico sul battente quando vige l'*orifice flow*,  $h_m$  e  $h_v$  sono rispettivamente il carico di monte e di valle quando vige il *full flow*).

pozzo stesso (Fig. 7.2). Il funzionamento “a stramazzo” (*weir flow* o *free flow*) prevale per piccole portate  $Q$  e piccoli tiranti  $h$ ; il profilo del getto all’imbocco è soggetto alla pressione atmosferica e il getto stesso, di forma anulare, garantisce nel suo centro l’ingresso di aria (il legame funzionale è  $Q = f(h_0^{3/2})$  dove  $h_0$  è il carico sulla luce). All’aumentare della portata e del tirante il getto anulare aumenta il suo spessore e riempie la sezione, cosicché il controllo del flusso si sposta dal perimetro dell’imbocco alla sezione piena, con un conseguente funzionamento “a battente” (*orifice flow*); il legame funzionale diventa  $Q = f(h_b^2)$  con  $h_b$  il carico sul battente. Tale fase è spesso instabile e accompagnata da notevoli fluttuazioni di pressione (Khatsuria, 2005). Per portate ancora maggiori, si raggiunge la condizione di “efflusso a pieno sbocco” (*full flow* o *pipe flow*), in cui il condotto è occupato dal liquido per il suo intero volume; in questo caso, la portata diventa funzione della differenza di carico  $\Delta h$  tra l’imbocco e lo sbocco in atmosfera, sia esso alla base del pozzo o in una sezione del tronco ricevente (il legame funzionale è  $Q = f(\Delta h)$ ) (USB, 1987; Fattor e Bacchiega, 2001; Khatsuria, 2005; Robinson e altri, 2010). Se però manca un’adeguata ventilazione, il riempimento del condotto non sarà completo, bensì si manifesteranno oscillazioni di portate e di livello, accompagnate da un fenomeno intermittente di sifonamento del pozzo (Khatsuria, 2005), interpretabile come un’alternanza di condizioni in cui il pozzo si presenta interamente o solo parzialmente occupato dal fluido.

Gli autori citati, insieme ad altri, si limitano a delineare il legame funzionale tra tiranti e portate, senza in alcun modo fornire nè indicazioni sulla forma esplicita della scala di deflusso nè dati sperimentali da poter sottopor-

re a verifica. Solo Khatsuria (2005) dà indicazioni lievemente più dettagliate per il calcolo della portata, prescrivendo di usare in condizione di *weir flow* un'equazione del tipo  $C_0 \cdot (\pi D) \cdot h^{3/2}$  con  $C_0$  il coefficiente di efflusso, funzione del tirante e della geometria dell'imbocco, e in condizioni di *full flow* una relazione del tipo  $Q = C_Q \cdot \sigma \cdot \sqrt{\Delta h}$  con  $C_Q$  il coefficiente di efflusso pari a  $(1 + K)^{-0.5}$ , dove  $K$  tiene conto delle perdite di carico.

Inoltre, molti di essi (in particolare USBR (1987) che dà approfondite indicazioni progettuali) si concentrano sull'imbocco a calice, che, essendo modellato in modo da accompagnare i filetti fluidi nella loro caduta per gravità, rende più semplice, anche numericamente, il problema trattato, evitando in special modo l'intrappolamento caotico di aria nel getto, almeno in fase di *full flow*, e l'instaurarsi di forti depressioni. Inoltre, nessuna attenzione viene prestata all'eventuale presenza di vortici all'imbocco del pozzo, che sono anzi la causa più comune di intrappolamento dell'aria nei condotti chiusi (Lamb, 1949): gli Autori si limitano per lo più a segnalare tali fenomeni come dannosi, poiché lesivi dell'efficienza del manufatto in quanto causa di vibrazioni e di un indesiderato trasporto di sacche d'aria, che possono compromettere il funzionamento di eventuali macchine idrauliche poste più a valle (Khatsuria, 2005).

# Capitolo 8

## Stato dell'arte

Cento volte al giorno ricordo a me stesso che la mia vita interiore e esteriore sono basate sulle fatiche di altri uomini, vivi e morti, e che io devo sforzarmi al massimo per dare nella stessa misura in cui ho ricevuto.

---

Albert Einstein

Come si evince dall'Introduzione, sebbene il pozzo verticale sia l'unico dispositivo in grado di superare notevoli dislivelli di quota, quando l'ingombro di una successione di pozzetti di salto non consente il loro utilizzo, l'analisi del comportamento idraulico di tale manufatto è approfondita solo per due particolari tipi di imbocco: quello a vortice, caratteristico di manufatti adoperati nelle reti di drenaggio, e quello a calice, prediletto nei manufatti di scarico superficiale degli invasi artificiali. Scarsa attenzione è stata invece prestata ai pozzi di caduta con imbocco a spigolo vivo, per i quali sussistono alcune considerazioni legate alle problematiche del deflusso di miscele aria-acqua, delle depressioni che possono svilupparsi lungo il pozzo e dei fenomeni pulsanti che possono aver luogo per l'assenza di un'adeguata ventilazione (Khatsuria, 2005).

Per la definizione delle condizioni di deflusso, si può in via del tutto generica fare riferimento alle considerazioni di massima presenti nella letteratura tecnica sui manufatti a calice (USBR, 1987; Fattor e Bacchiega, 2001; Khatsuria, 2005; Robinson *e altri*, 2010): si attenderanno cioè diverse condizioni di deflusso al variare di portate e tiranti, in particolare una condizione di *weir flow* per portate minime e una di *full flow* per portate massime.

Anche dal punto di vista della sperimentazione il problema dell'imbocco a spigolo vivo è trattato di rado; si descriveranno nel seguito tre lavori

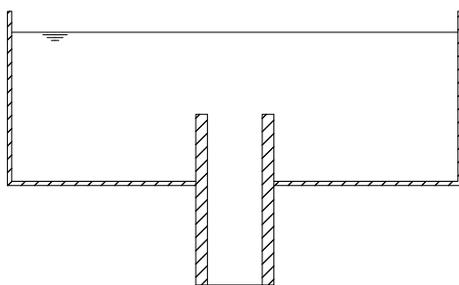


Figura 8.1: Tubo aggiuntivo interno; la sagomatura del bordo superiore è una variabile della sperimentazione di Binnie (1938) e di Anwar (1965).

sperimentali (Binnie, 1938; Anwar, 1965; Anderson *e altri*, 1971) che, pur con alcune differenze, sono tra i più attinenti alla ricerca in oggetto, e sono stati di fondamentale importanza nella progettazione dell'apparato sperimentale e nella successiva attività di analisi dei risultati.

Binnie (1938) analizza il flusso attraverso un *overflow pipe*, ovvero un tubo aggiuntivo interno (Fig. 8.1). Vengono studiati diverse lunghezze, diverse sagomature degli spigoli dell'imbocco (piatti o a spigolo vivo) e soprattutto diverse tipologie di imbocco (diretto o convergente). Per tutte le tipologie studiate viene ricavata una scala di deflusso che risulta formata da due rami, uno inferiore e uno superiore (Fig. 8.2): per il primo ramo, la condizione di deflusso vede piccoli incrementi di tirante in conseguenza di notevoli variazioni di portata, mentre l'opposto si verifica per il secondo ramo, per il quale la variazione di portata è pressoché irrilevante a fronte di elevate variazioni di carico. La prima condizione di deflusso viene denominata dall'Autore *free flow*, essendo caratterizzata dalla presenza di una vena contratta in corrispondenza della luce e di un getto verticale di diametro pressoché uguale a quello della sezione contratta (almeno entro una certa distanza dall'imbocco, oltre la quale l'effetto della tensione superficiale determina un restringimento del getto verso l'asse del tubo verticale e la conseguente rottura in gocce); tale regime è in sostanza assimilabile a un deflusso a stramazzone. La seconda condizione è denominata di *full flow* poiché il tubo si presenta in pressione per la sua intera lunghezza; è questo l'unico caso in cui viene tentato un approccio analitico, ipotizzando che per questo regime la portata sia proporzionale a  $\sqrt{h + L}$  essendo  $h$  il carico sulla sezione di imbocco e  $L$  la lunghezza del pozzo.

Le scale di deflusso oggetto di tale studio vengono ricavate attraverso prove sperimentali che vedono aumentare lentamente la portata inviata al sistema, e dunque il carico sulla sezione di imbocco. Inizialmente, ovvero per tiranti molto bassi, il getto si costituisce in forma anulare, perfettamente aderente alle pareti interne del tubo e con una cavità cilindrica centrale occupata da aria. All'aumentare della portata e del tirante, il getto aumenta

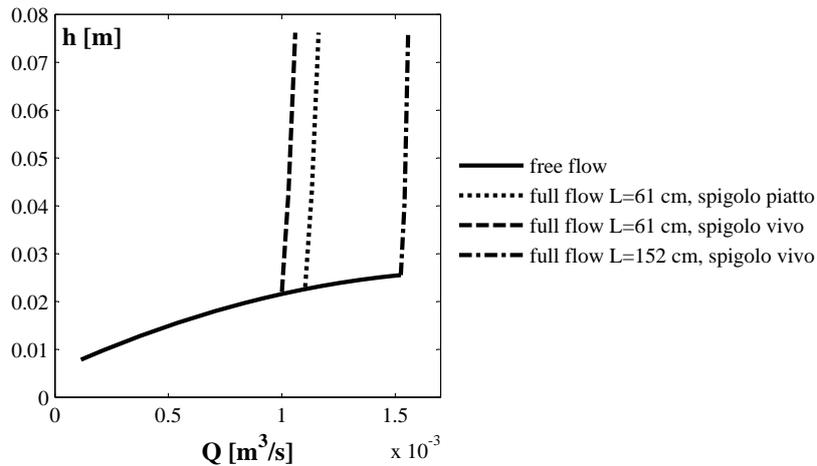


Figura 8.2: *Free flow* e *full flow* nella sperimentazione di Binnie (Binnie, 1938) su tubi di diametro interno pari a 2.54 cm.

di spessore e diventa instabile, con la cavità centrale che comincia ad aprirsi e chiudersi impulsivamente, accompagnata da un forte rumore e da un'analoga instabilità periodica nel getto in uscita dal tubo. Un ulteriore aumento di portata comporta un aumento di frequenza di tale instabilità, fino a un massimo oltre il quale essa non è più visibile, nè si avverte alcun rumore prodotto dal flusso, fino al raggiungimento di un tirante critico che segna il punto finale del ramo inferiore della scala di deflusso (Fig. 8.2). Superato tale valore, un ulteriore aumento di portata comporta il passaggio al secondo ramo della scala di deflusso; in questa fase, la superficie libera della vasca di carico si presenta indisturbata, a meno di piccoli vortici che si osservano in prossimità del tirante critico, accompagnati da un forte rumore, che comunque risultano molto brevi e inducono una rotazione del pelo libero solo entro breve distanza dal loro centro. Soltanto durante la sperimentazione su un tubo di lunghezza pari a 152 cm circa, il valore massimo sperimentato, alcuni vortici risultavano tanto ingombranti rispetto alla sezione di imbocco da causare un lieve aumento nel livello del pelo libero. L'Autore effettua anche alcune prove al diminuire della portata, per evidenziare la presenza di una eventuale isteresi; non ci sono però tracce di tale fenomeno, ed in particolare il percorso a ritroso non risulta addolcire la discontinuità corrispondente al passaggio tra *full flow* e *free flow*.

Durante alcune prove sperimentali, la condizione di deflusso cambia spontaneamente dal regime di *full flow* ad un regime che l'Autore definisce *Borda free flow*, caratterizzato dal distacco del getto dalle pareti del tubo, con conseguente forte riduzione della portata a parità di tirante (Fig. 8.3). In questo caso al diminuire della portata, superato un valore critico del tirante, la condizione di deflusso diventa di *Borda full flow*, con il getto che si espande a riempire l'intero tubo verticale, ma in condizioni di estrema turbolenza. È

stato anche osservato, effettuando prove sia all'aumentare che al diminuire della portata, che esiste una regione di sovrapposizione tra il *Borda free flow* e il *Borda full flow* (Fig. 8.3).

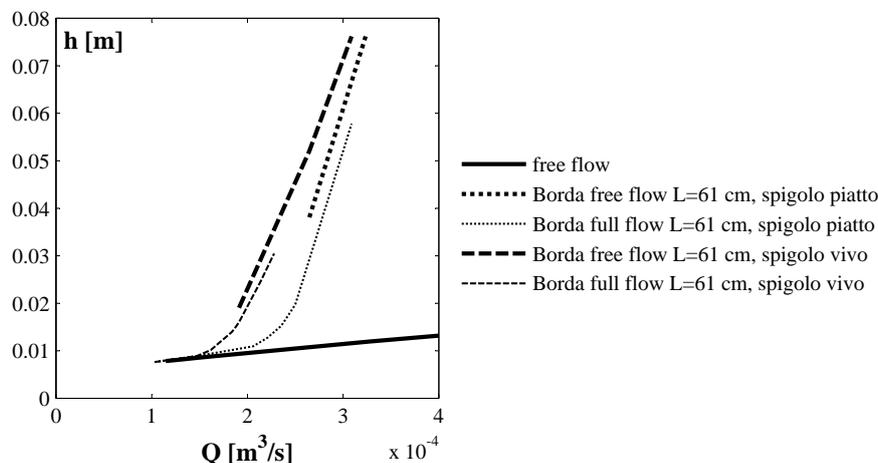


Figura 8.3: *Borda Free flow* e *Borda full flow* nella sperimentazione di Binnie (Binnie, 1938) su tubi di diametro interno pari a 2.54 cm.

Sono infine presentati risultati relativi alla quantità d'aria richiamata nel tubo verticale, che va ad aumentare, all'aumentare della portata, durante la fase di *free flow*, per poi cessare durante la fase di *full flow*.

I risultati ottenuti da Binnie sono estremamente particolareggiati nella descrizione, anche fotografica, delle condizioni di deflusso; tuttavia, i diametri e le lunghezze usati (dell'ordine dei 2-3 cm i primi, dei 60-70 cm le seconde) fanno sì che lo stesso autore ipotizzi effetti di scala, legati soprattutto alla tensione superficiale nel fenomeno di intrappolamento dell'aria, esprimendo riserve circa l'applicabilità dei risultati a situazioni reali e raccomandando sperimentazioni simili a scala maggiore.

Una sperimentazione analoga viene condotta da Anwar, a monte di una sperimentazione riguardante le condizioni di innesco di vortici in un serbatoio (Anwar, 1966, 1968); viene infatti effettuato uno studio preparatorio che chiarisca le condizioni di deflusso di un *overflow pipe* verticale posto sul fondo di un serbatoio (Anwar, 1965). Il suo apparato sperimentale presenta dimensioni maggiori rispetto a quello adoperato in Binnie (1938), con un serbatoio cilindrico di 91 cm di diametro e 150 cm di altezza. I diametri  $D$  dei tubi verticali adoperati variano tra 3.8 e 15.3 cm, ognuno dei quali caratterizzato da un diverso spessore  $t$ , variabile tra 5 e circa 10 mm, al fine di fugare ogni dubbio circa eventuali effetti di scala. Ciascun tubo è lungo 61 cm e rientra nella vasca, al di sopra del fondo, di 15 cm; pertanto, lo spessore del tubo è una variabile importante nel processo di deflusso, poichè determina una diversa contrazione dei filetti fluidi. Allo stesso modo,

per ciascun tubo, la ricostruzione della scala di deflusso viene effettuata sagomando gli spigoli dell'imbocco in modo sia piatto che arrotondato.

La ricostruzione delle scale di deflusso, non riportate in alcuna pubblicazione, risulta analoga a quella descritta da Binnie (1938). All'aumentare graduale della portata in ingresso al sistema, dapprima si riscontra un getto anulare che aderisce alle pareti verticali del tubo (è questa la regione di *free flow*, ovvero di efflusso a stramazzo), quindi la cavità centrale, riempita di aria, si restringe sempre di più fino a creare una condizione di "apertura" e "chiusura" a intermittenza della cavità. Per un ulteriore aumento della portata, il regime di deflusso passa alla condizione di *full flow*, dove il tubo è interamente riempito di acqua e ad una piccola variazione di portata corrisponde una consistente variazione di tirante. In questi casi, la superficie libera appare immobile eccetto per la formazione di vortici, che comunque riescono a perturbare solo la zona di pelo libero a loro più vicina. L'Autore ipotizza che il *free flow* sia retto da un'equazione del tipo:

$$Q = C \cdot \pi D H \cdot \sqrt{2gH} \quad (8.1)$$

Tale equazione risulta valida anche per il *Borda free flow*, che, risultato instaurarsi spontaneamente in alcune circostanze, viene analizzato separatamente adoperando, per gli stessi tubi verticali, una lunghezza pari al diametro.

Per il *full flow* si ipotizza invece una relazione del tipo:

$$Q = C \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{2g(H + L)} \quad (8.2)$$

dove  $D$  è il diametro interno del tubo verticale,  $L$  è la sua lunghezza e  $H$  è il carico sulla sezione di imbocco. Lo studio si concentra quindi sulla dipendenza del coefficiente di efflusso  $C$  dal rapporto  $H/D$  e dal rapporto  $t/D$ , essendo  $t$  lo spessore del tubo.

Per quanto concerne il *free flow*,  $C$  risulta fortemente dipendente da  $H/D$ , crescendo al crescere di questo; in particolare,  $C$  risulta essere, a parità di  $H/D$ , tanto maggiore quanto minore è lo spessore  $t$ , con riferimento ad una sagomatura arrotondata degli spigoli. Per quanto riguarda invece il *Borda free flow*, le curve  $C(H/D)$  presentano una prima breve fase di crescita, fino a un massimo che è tanto maggiore quanto minore è lo spessore e, a parità di spessore, maggiore per la sagomatura arrotondata rispetto a quella piatta; tali massimi variano comunque tra circa 0.55 e circa 0.7, e si raggiungono in corrispondenza di un  $H/D$  variabile tra 0.5 e 1.5 circa. L'Autore ipotizza che un imbocco allineato con il fondo del serbatoio, e non proiettato all'interno come nel caso in esame, sia assimilabile ad un imbocco con sagomatura piatta e spessore infinito, per il quale dovrebbero attingersi i valori minori di  $C$ , comunque non inferiori a 0.5 che è il minimo fisicamente ammissibile (Lamb, 1937). Per quanto riguarda infine il *full flow*,  $C$  si

mantiene pressoché costante con  $H/D$ , in particolar modo attingendo valori tanto maggiori quanto maggiore è lo spessore, e, a parità di spessore, valori maggiori per il caso di spigoli arrotondati;  $C$  risulta comunque compreso tra 0.7 e 0.85 circa, per  $H/D$  variabile tra 5 e 25 circa.

Un analogo studio sui coefficienti di efflusso viene condotto da Jan e Nguyen (2009) con simili risultati: il coefficiente di efflusso risulta crescere al diminuire del diametro dell'imbocco e del carico, il primo fattore più influente del secondo; tuttavia, è da notare che l'apparato sperimentale è sensibilmente diverso, avendo il fondo inclinato di  $45^\circ$  verso il centro.

Sia Binnie (1938) che Anwar (1965) danno cenni sulle caratteristiche geometriche del moto, il primo in termini descrittivi, il secondo tentando anche un approccio analitico nel caso di *full flow*. È da notare però che nessuno degli autori citati fa cenno alla distribuzione delle pressioni lungo il tubo; si devono invece a Russo Spena (1951) notizie riguardo la presenza di pressioni negative, di notevole entità nelle vicinanze dell'imbocco del tubo, nonostante egli faccia riferimento alla condizione di tubo orizzontale che diparte da una delle pareti laterali di un serbatoio.

Più recente è la sperimentazione del St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory (Anderson *e altri*, 1971) alla quale si è fatto maggior riferimento per la messa a punto dell'apparato sperimentale utilizzato nella ricerca. L'apparato utilizzato dagli Autori consiste in un tubo verticale di circa 12 cm di diametro e 15 m di lunghezza nel quale è direttamente immessa, tramite un braccio orizzontale, una portata regolabile, mentre una valvola consente l'imposizione di una perdita di carico localizzata anch'essa variabile. Ciò consente di indurre il fenomeno di cavitazione, che è il principale oggetto di studio di tale ricerca, anche per portate relativamente basse. Stabilite le grandezze caratteristiche (la portata  $Q$ , il tirante  $h$ , la pressione  $P$ , il diametro del pozzo  $D$ , la sua lunghezza  $L$ , l'accelerazione di gravità  $g$  e il peso specifico del fluido  $\gamma$ ), viene fornita una relazione per ogni tipo di deflusso, sia in termini dimensionali che adimensionali, ed in particolare:

- *Weir flow*: tale regime è caratterizzato dal fatto che il getto è in costante contatto con l'aria che, essendo l'apertura circolare, si trova nel condotto cilindrico interno al getto ma anche tra il getto e le pareti del tubo. La lunghezza e scabrezza del pozzo non hanno quindi alcuna influenza, mentre il deflusso dipende dal perimetro dell'imbocco, cioè dal suo diametro. La pressione relativa nella sezione contratta orizzontale è nulla. La relazione che lega portata e tirante è la seguente:

$$Q = \mu \cdot \pi D \cdot h \sqrt{2gh} \quad (8.3)$$

con  $\mu = 0.74$ , che in termini adimensionali diventa:

$$\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = \mu \cdot \pi \sqrt{2} \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{3/2} \quad (8.4)$$

Dalle equazioni 8.3 e 8.4 si evince che ad un piccolo aumento del tirante corrisponde un notevole aumento di portata (Fig. 8.4).

- *Transitional flow*: all'aumentare della portata e quindi del tirante, ma per valori ancora bassi, il getto con sezione di corona circolare che caratterizzava il *weir flow* viene sigillato e l'imbocco del pozzo tende a comportarsi come bocca a battente. Tuttavia, per lunghezze anche modeste, il getto tende a riempire il tubo in tutta la sezione cosicché si instaura un regime di depressione, con valori assoluti che aumentano all'aumentare del tirante. Detta  $P_B$  la pressione (negativa) in una sezione poco al di sotto dell'imbocco del pozzo, il teorema di Bernoulli porta alla seguente espressione:

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} \cdot \sqrt{2g \left( h - \frac{P_B}{\gamma} \right)} \quad (8.5)$$

che in termini adimensionali diventa:

$$\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = \pi \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \sqrt{\frac{h}{D} - \frac{P_B/\gamma}{D}} \quad (8.6)$$

da cui si vede che il deflusso dipende dalla sezione del pozzo, e dunque dal quadrato del diametro. Nel caso in cui nella sezione contratta vi sia pressione atmosferica, tale equazione conduce all'espressione di deflusso da battente circolare.

- *Cavitation flow*: se la pressione negativa al di sotto dell'imbocco raggiunge il valore di cavitazione (che oltre a dipendere dalla temperatura varia anche con la quantità di aria intrappolata nel fluido), l'equazione relativa al *transitional flow* si specializza nella seguente (Fig. 8.4):

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} \cdot \sqrt{2g \left( h - \frac{P_C}{\gamma} \right)} \quad (8.7)$$

che in termini adimensionali diventa:

$$\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = \pi \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \sqrt{\frac{h}{D} - \frac{P_C/\gamma}{D}} \quad (8.8)$$

La cavitazione si estende, a partire dall'imbocco, per una lunghezza che dipende dalla portata e dalle caratteristiche geometriche del pozzo, nella quale la pressione sarà costante e pari al valore di cavitazione; un fronte di *shock* segna il passaggio dal regime di cavitazione al sottostante regime di pressurizzazione, nel quale tuttavia può essere notata la presenza di bolle di aria forse rilasciate dalla zona di cavitazione.

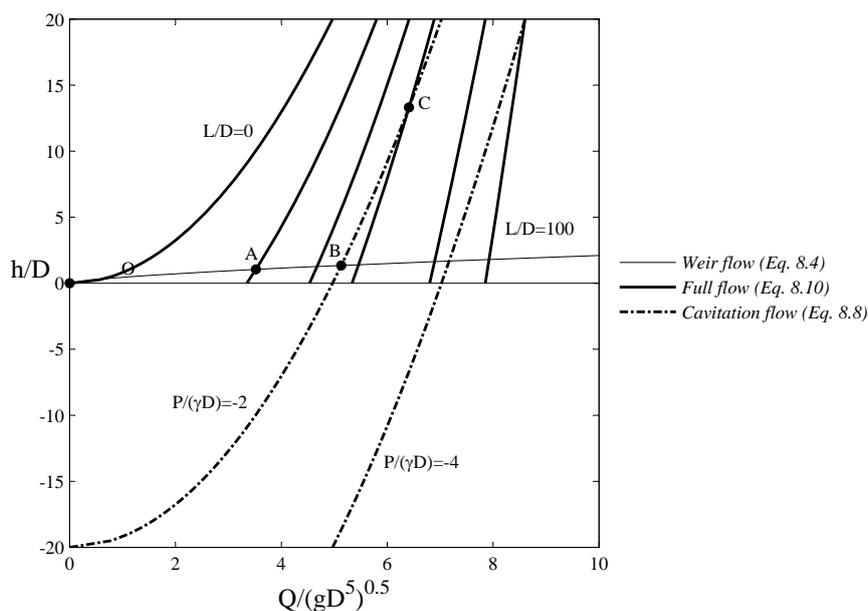


Figura 8.4: Condizioni di deflusso secondo Anderson e altri (1971).

- *Full flow*: all'aumentare della portata e del tirante, il fronte di *shock* che separa la zona di cavitazione da quella inferiore si sposta verso l'imbocco fino a che l'intero tubo verticale è in condizione di *full flow* (o regime di pressurizzazione), visibilmente distinguibile da ogni altra condizione per l'assenza di bolle o sacche di aria. In questo caso il teorema di Bernoulli porta alla seguente equazione:

$$Q = \pi \frac{D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g}{1+\beta}} \sqrt{h+L} \quad (8.9)$$

che in termini adimensionali diventa:

$$\frac{Q}{\sqrt{gD^5}} = \pi \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+\beta}} \sqrt{\frac{h}{D} + \frac{L}{D}} \quad (8.10)$$

dove  $\beta = f \frac{L}{D}$ , essendo  $f$  l'indice di attrito, posto dagli Autori arbitrariamente pari a 0.01. In maniera esattamente opposta al regime di *weir flow*, ad un notevole aumento di tirante corrisponde un piccolo aumento di portata (Fig. 8.4).

Si può notare che, poichè il regime di cavitazione dipende dal valore assoluto del diametro, è necessario tracciare una curva per ogni diametro; il regime di *full flow* è adimensionalizzato rispetto al diametro, ma è necessario tracciare una curva per ogni lunghezza (sempre adimensionalizzata rispetto al diametro); il regime di *weir flow* è completamente adimensionale. Supponendo di partire dall'origine degli assi (punto  $O$ ), all'aumentare del tirante

ci si muove lungo la curva corrispondente al *weir flow*; se il rapporto  $L/D$  esaminato è piccolo, ci si sposta sulla curva corrispondente, all'aumentare del tirante, in corrispondenza del punto di intersezione tra le due curve (punto *A*; ci si sposta quindi direttamente dal *weir flow* al *full flow*). Se invece il rapporto  $L/D$  è sufficientemente grande, la curva di *weir flow* interseca prima la curva di cavitazione (punto *B*); all'aumentare del tirante ci si sposterà dunque su quella curva finché essa non intersecherà la curva di *full flow* (punto *C*; ci si sposta quindi dal regime di *weir flow* a quello di cavitazione e successivamente al regime di *full flow*). Pozzi con diametri grandi possono dunque cavitare più facilmente, vale a dire con lunghezze adimensionali inferiori, rispetto ai pozzi con diametro più piccolo, che caveranno invece con lunghezze adimensionali molto grandi.

Sia gli esperimenti di Anwar (Anwar, 1965) che di Binnie (Binnie, 1938) sono effettuati a mezzo di un impianto sperimentale perfettamente simmetrico rispetto al pozzo, e con un sistema di dissipazione dell'energia della portata in ingresso tale da causare un perfetto regime di calma nel serbatoio, a meno della chiamata allo sbocco; nonostante tali accorgimenti, comunque, non si riesce ad evitare completamente l'instaurarsi in vasca di fenomeni vorticosi, seppure di modesta entità. Nella trattazione degli Autori, comunque, le configurazioni adottate per l'impianto sperimentale permettono di osservare solo ed esclusivamente il fenomeno di caduta dell'acqua, prescindendo da una serie di meccanismi secondari che tuttavia corrispondono alla normalità nelle situazioni reali. Ad esempio, l'effetto di una velocità di arrivo della corrente al pozzo, seppure minima, potrebbe tradursi in un movimento tangenziale dell'acqua rispetto al pozzo, con conseguente insorgere di vortici. È nata dunque l'esigenza di indagare anche questo aspetto, soprattutto per capire quali conseguenze la presenza dei vortici possa comportare nel pozzo e nei regimi di deflusso; è infatti noto che i fenomeni vorticosi possono avere un'influenza negativa sul comportamento di un qualsiasi sistema, ed in particolare riduzioni di portata, vibrazioni, danni strutturali nonché cali di efficienza di eventuali macchine idrauliche poste a valle (Rindels e Gulliver, 1983).

La principale causa di formazione di mulinelli e vortici risiede nell'eccentricità tra l'imbocco di un condotto e il canale in arrivo ad esso. Durgin e Hecker (1978) definiscono tre fondamentali sorgenti di vorticità, mostrate in Fig. 8.5, nello specifico deviazioni, velocità non costanti nella sezione e ostruzioni di qualsiasi natura, tutti elementi che in sostanza determinano l'insorgere di gradienti di velocità. Tali elementi favoriscono l'instaurarsi di una circuitazione nel campo di moto: in via generale, maggiore è l'area affetta da circuitazione, più stabili e intensi, e probabilmente dannosi, saranno i conseguenti vortici.

In concomitanza con le molteplici condizioni idrauliche e geometriche che possono dar luogo alla formazione di vortici, esistono diverse classificazioni

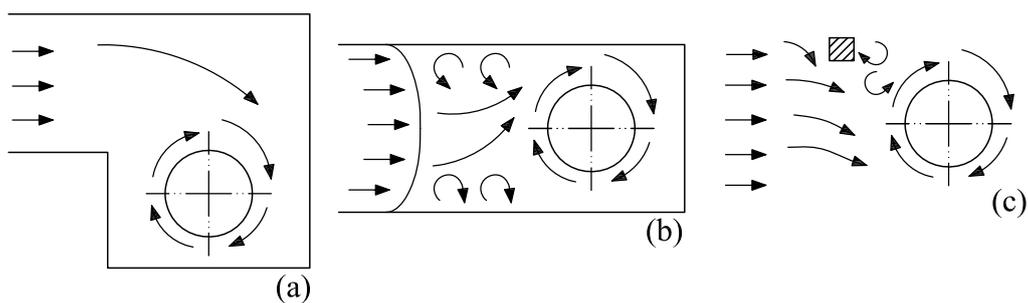


Figura 8.5: Possibili cause di vortici secondo Durgin e Hecker (1978): deviazione (a), profili di velocità (b), ostruzione (c).

per questi ultimi (Knauss, 1987), ed in particolare:

- una classificazione in base alla posizione del vortice rispetto all'imbocco. Si distinguono in particolare vortici *superficiali*, che partono appunto dalla superficie libera e sono quindi probabile fonte di richiamo di aria; vortici *subsuperficiali*, che partono dal fondo o dalle pareti, e sono responsabili dell'intrappolamento di mulinelli all'interno dell'imbocco (Fig. 8.6).
- una classificazione in base allo sviluppo rispetto all'imbocco. Si distinguono vortici *non sviluppati*, per i quali la depressione del pelo libero non interessa tutta la colonna d'acqua; vortici *critici*, per i quali la massima depressione corrisponde alla sezione di imbocco, e vortici *completamente sviluppati*, per i quali la depressione interessa anche il condotto oltre la sezione di imbocco, e che sono i maggiori responsabili del richiamo di aria (Fig. 8.7). La stessa classificazione viene spesso fatta corrispondere a quella che distingue tra vortici *deboli*, *critici* e *forti*.
- una classificazione in base alle caratteristiche visive del vortice. Tale classificazione, detta ARL poiché messa a punto dall'Alden Research Laboratory, è strettamente correlata all'intensità del vortice; si tratta infatti di associare a ciascuna forma la capacità o meno di trascinare materiale estraneo, che può essere colorante, materiale flottante o aria per intensità crescenti (Fig. 8.8).
- una classificazione in base alla stabilità del vortice nel tempo. Si distinguono quindi vortici *stabili* e vortici *instabili* o *intermittenti*. Anche per una portata in ingresso al sistema e un carico sull'imbocco costanti, un vortice può risultare instabile sia nel tempo sia dal punto di vista della sua posizione rispetto all'imbocco, a causa di variazioni anche lievi nella distribuzione di velocità della corrente, nella turbolenza, nella dissipazione energetica locale, nell'interazione della corrente

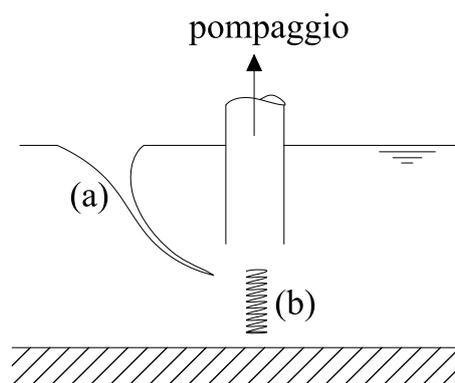


Figura 8.6: Classificazione dei vortici in base alla posizione: superficiale (a) e subsuperficiale (b).

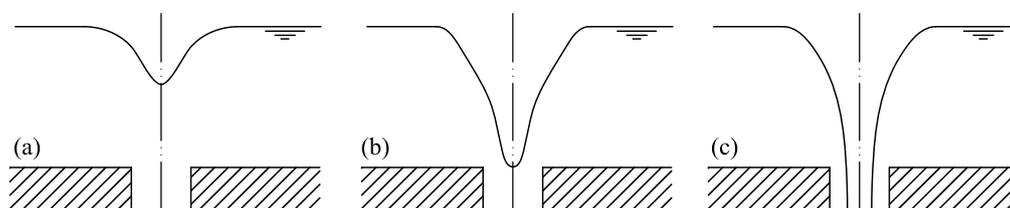


Figura 8.7: Classificazione dei vortici in base allo sviluppo rispetto all'imbocco: non sviluppato (a), critico (b), completamente sviluppato (c).

con le condizioni al contorno. L'instabilità di un vortice può essere valutata statisticamente, effettuando una registrazione accurata della successione nel tempo delle varie tipologie di vortice; sarà dunque possibile valutare, ad esempio, la tipologia "media" di vortice, o il tipo che viene superato solo per il 10% del tempo (con riferimento ad un arbitrario periodo di osservazione).

La maggior parte degli studi sui vortici (Knauss, 1987) si fonda sulla ricerca della "sommersione critica", cioè di quel tirante al di sopra del quale, per un tempo sufficientemente lungo, non si osservano vortici "completamente sviluppati" ossia il cui nucleo centrale di aria sia in collegamento con l'imbocco del pozzo; sono tuttavia ammessi semplici *dimple*, cioè depressioni del pelo libero in alcun modo collegate con l'imbocco (Fig. 8.8), che rappresentano il primo stadio evolutivo di un vortice. Tuttavia, gran parte delle ricerche mette in relazione la sommersione critica, anche adimensionalizzata rispetto al diametro del condotto, con un numero adimensionale  $N_{\Gamma}$  che è legato alla circuitazione, a sua volta dipendente dalla velocità tangenziale la cui misura è una fase estremamente delicata della sperimentazione; Anwar (1968) è riuscito a legarla al raggio del vortice, che tuttavia è un parametro di altrettanto difficile valutazione. In questo modo, la depressione  $s$  del pelo libero in presenza di un vortice risulta proporzionale all'altezza cinetica

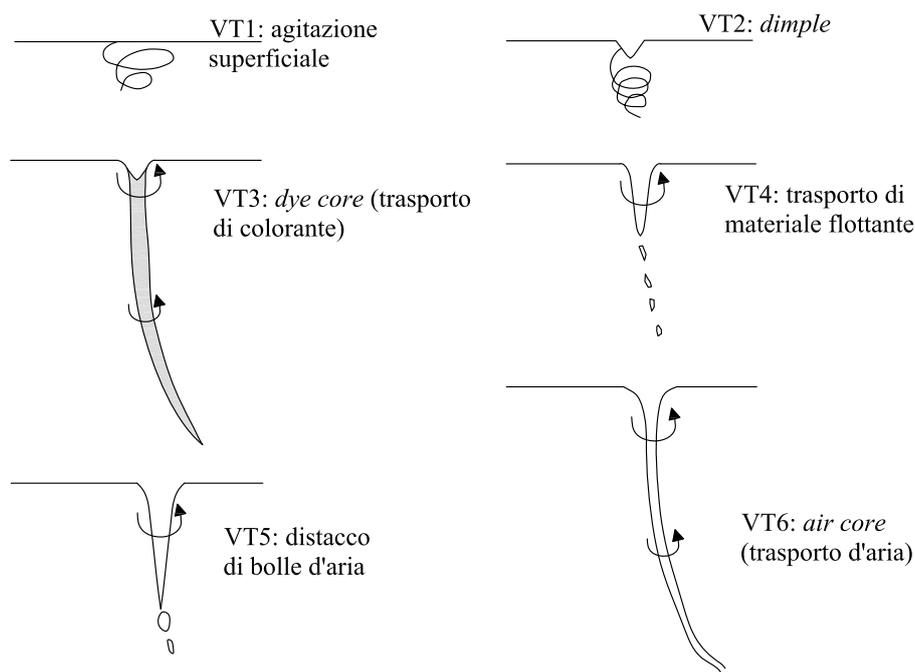


Figura 8.8: Classificazione ARL dei vortici in base alla capacità di trasporto.

legata alla velocità tangenziale  $v_t$ , la cui presenza determina una diminuzione locale della pressione idrostatica, con il conseguente abbassamento della superficie libera:

$$s = 0.6 \cdot \frac{v_t^2}{2g} \quad (8.11)$$

Relazioni che legano la sommersenza critica con i parametri caratteristici del deflusso sono stati ottenute applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, sommando il moto radiale verso l'imbocco al moto vorticoso intorno ad esso (Odgaard, 1984), nelle ipotesi di moto permanente e assial-simmetria. Nelle stesse ipotesi, relazioni più complesse sono state ottenute prescindendo dal numero di circuitazione, legando la sommersenza critica adimensionale al rapporto tra velocità di ingresso dell'acqua nel pozzo e velocità di arrivo della corrente, nonché all'eventuale sporgenza del tubo verticale dal fondo; queste relazioni, verificate sia con acqua defluente in un canale (Yildirim e Kocabas, 1995) che in serbatoio (Yildirim e Kocabas, 1998), sono tuttavia di non facile applicazione in quanto uno dei parametri è il coefficiente di efflusso del pozzo, il cui valore potrebbe dipendere dalla presenza dei vortici (Stevens e Kolf, 1959; Anwar, 1966; Daggett e Keulegan, 1974).

## 8.1 Sintesi delle ricerche effettuate

Come si evince da quanto finora esposto, il problema del deflusso attraverso un pozzo verticale con imbocco a spigolo vivo non è in sostanza mai affrontato direttamente nella letteratura tecnica. La maggioranza degli studi, sia quelli più datati che quelli più recenti, si concentrano infatti su configurazioni simili, per le quali vengono esposte considerazioni di carattere generale che possono essere ritenute valide per il caso in esame, ed altre più specifiche, ricavate sotto condizioni particolari quali l'imbocco a calice, a vortice, o di tubo addizionale interno. Tra le prime si nota in particolare la variabilità dei regimi di deflusso con il carico sulla luce, ovvero con la portata scaricata: essi oscillano tra due condizioni limite, *weir flow* o *free flow* e *full flow* o *pipe flow*, corrispondenti rispettivamente all'efflusso a stramazzo e a pieno sbocco, tra le quali è presente uno stato di transizione il cui comportamento è solo ipotizzato, ma che di fatto non è ben identificabile in nessuna delle scale di deflusso sperimentali. Per quanto riguarda il *weir flow*, viene ipotizzato che tale condizione non dipenda nè dalla lunghezza del pozzo nè dallo spessore del tubo verticale, qualora questo sia una variabile influente sul sistema, mentre da alcuni Autori viene suggerita una variabilità con il carico del coefficiente di efflusso. Per quanto riguarda il *full flow*, invece, tutti gli Autori concordano nell'attribuire la riduzione nella variabilità delle portate alla presenza di perdite di carico (di cui quelle localizzate sempre ritenute trascurabili), e nel ritenere il coefficiente di efflusso particolarmente dipendente dalle caratteristiche geometriche del pozzo, in particolare lunghezza e diametro, e indipendente dal carico. Dal punto di vista analitico, il problema è affrontato solo marginalmente; le relazioni proposte, quasi mai calibrate su dati sperimentali e comunque riferite a configurazioni diverse da quella in esame, presentano per entrambi i regimi una fortissima dipendenza da coefficienti di efflusso che sono imprescindibilmente legati alla configurazione sperimentale, e dunque non sono trasferibili ad altre tipologie di pozzo. Si rende perciò necessaria una sperimentazione *ad hoc* per la caratterizzazione e per la definizione analitica dei regimi di deflusso; tale sperimentazione sarà anche utile a chiarire l'influenza di eventuali fenomeni vorticosi sul deflusso.

## Apparato sperimentale

Misura ciò che è misurabile, e  
rendi misurabile ciò che non lo è.

---

Galileo Galilei

A differenza del partitore semi-frontale, lo studio del funzionamento idraulico del pozzo di caduta viene affrontato in maniera quali-quantitativa senza tuttavia tener conto delle particolari caratteristiche del manufatto reale che ha ispirato la campagna di indagine. In altre parole, il pozzo di caduta realizzato in laboratorio non intende rappresentare in alcun modo il modello fisico del manufatto ubicato all'estremità del Collettore Vecchio Pastore Laganà; pertanto non verrà fornita nessuna indicazione circa i criteri di similitudine adottati.

La struttura oggetto della campagna sperimentale è costituita da tre elementi: una vasca, un pozzo verticale e un sistema di ventilazione opzionale, tutti realizzati in Plexiglas per favorire l'osservazione del fenomeno idraulico.

- La vasca presenta un'altezza di 1.25 m e una sezione piana rettangolare di dimensioni 0.71 m x 2.07 m; una parete filtrante, costituita da una struttura in legno riempita di anelli di gomma di dimensioni grossolane, la suddivide trasversalmente in due parti uguali (si farà riferimento nel testo alla "vasca di alimentazione" e alla "vasca di carico" per indicare rispettivamente le porzioni di vasca a monte e a valle del filtro)(Fig. 9.1). La portata perviene alla vasca di alimentazione tramite una tubazione in pressione; in particolare, è possibile scegliere tra una tubazione  $\Phi 100$ , più adatta per portate basse, e una  $\Phi 200$ , più conveniente per portate medio-alte. È in effetti possibile adoperare anche una condotta  $\Phi 300$ , che però non si è mai rivelata necessaria durante la campagna sperimentale. La parete filtrante è inserita al fine di dissipare quanto più possibile l'energia dell'acqua proveniente

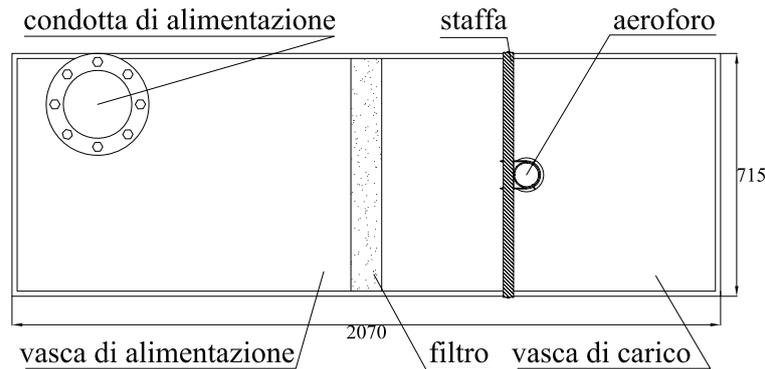


Figura 9.1: Pianta dell'apparato sperimentale; tutte le dimensioni sono espresse in [mm].

dall'alimentazione, così da ricreare condizioni di calma nella vasca di carico, in cui è posizionato il manufatto di scarico.

- Il pozzo di caduta è costituito da un tubo verticale che diparte dal fondo della vasca di valle, su cui è stata praticata un'apertura circolare di diametro pari al diametro esterno del pozzo. L'imbocco del pozzo si presenta dunque a spigolo vivo. Per mantenerlo in posizione, il tubo verticale è flangiato all'intradosso del fondo della vasca, ed è ancorato all'incastellatura che costituisce il supporto all'intera struttura in prossimità della sua parte terminale. Lungo il tubo sono praticati dei fori, con un interasse pari a un multiplo del diametro interno del tubo, in cui sono alloggiati prese per la misura della pressione.

Più in particolare, nel corso della sperimentazione sono stati impiegati tre diversi tubi di diametro nominale DN100, DN70 e DN50; per i primi due l'interasse tra le prese di pressione è stato scelto pari a una volta il diametro interno del tubo, mentre nel terzo caso si è scelto un interasse pari al doppio del diametro. Poiché la luce sul fondo della vasca di carico ha le stesse dimensioni del tubo DN100, per permettere di alloggiarvi in modo efficace anche il DN70 e il DN50 si sono impiegate due piastre, anch'esse in Plexiglas, di spessore pari a 6 mm, poggiate e bullonate sul fondo della vasca di carico; nelle due piastre sono state praticate due luci di dimensioni corrispondenti rispettivamente al diametro esterno del DN70 e del DN50, perfettamente concentriche alla luce originaria e tali da creare un perfetto aggancio tra il tubo verticale e la vasca di carico con il solo modesto inconveniente consistente nell'innalzamento di 6 mm del fondo della vasca.

Lo scarico avviene in una vasca di raccolta che garantisce il ricircolo della portata, tramite un sistema di pompaggio che garantisce il solle-



Figura 9.2: Dettagli dell'impianto di sollevamento: pannello di controllo (a) e saracinesca (b).

vamento di una portata massima pari a 50 l/s, quasi coincidente con la portata massima sperimentata (Fig. 9.2).

- Il sistema di ventilazione è costituito da un tubo aeroforo coassiale al pozzo verticale. La concentricità e la stabilità dell'aeroforo sono fortemente inficiate dall'azione della corrente in arrivo dalla vasca di alimentazione, soprattutto per tiranti bassi; è stato pertanto necessario fissare entrambe le estremità dell'aeroforo, ancorando quella superiore, a contatto con l'atmosfera, ad una barra di ferro sulla sommità della vasca, e quella inferiore, immersa nel fluido, tramite un tripletto di viti usate come distanziometri.

I diametri nominali scelti per i tubi aerofori, sempre in Plexiglas, sono dN70, dN50 e dN30. Il sistema di bloccaggio ne consente la mobilitazione in qualsiasi momento, al fine di valutare l'influenza sul comportamento del sistema dei diversi gradi di approfondimento degli aerofori all'interno del pozzo, anch'essi scelti come multipli del diametro del pozzo.

Una vista laterale non in scala dell'apparato sperimentale è mostrata in Fig. 9.3; i particolari costruttivi dell'imbocco sono illustrati in Fig. 9.4, Fig. 9.5 e Fig. 9.6; la Fig. 9.7 mostra invece la sezione longitudinale dei tubi verticali sperimentali, con la relativa disposizione delle prese di pressione.

## 9.1 Attrezzature

L'impianto sperimentale è corredato di una serie di strumenti di misura necessari per monitorare i valori della portata in ingresso al sistema, del livello

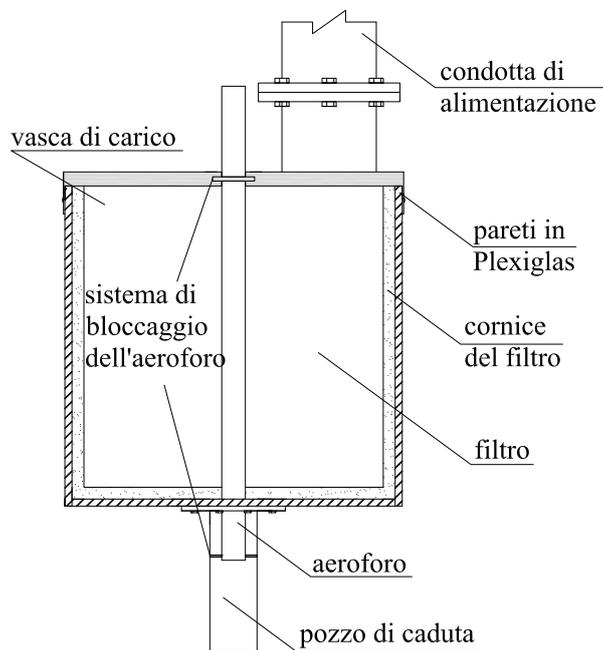


Figura 9.3: Vista laterale, non in scala, dell'apparato sperimentale; lo spessore delle pareti della vasca è di 1.5 cm, quello della cornice del filtro è di 7 cm.

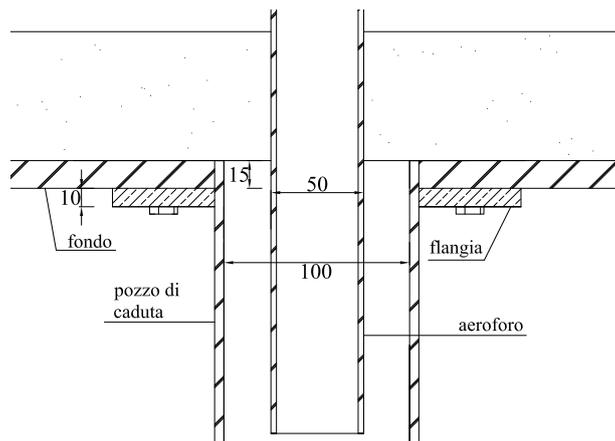


Figura 9.4: Particolare dell'imbocco: DN100 e dN50 (tutte le misure sono espresse in [mm]).

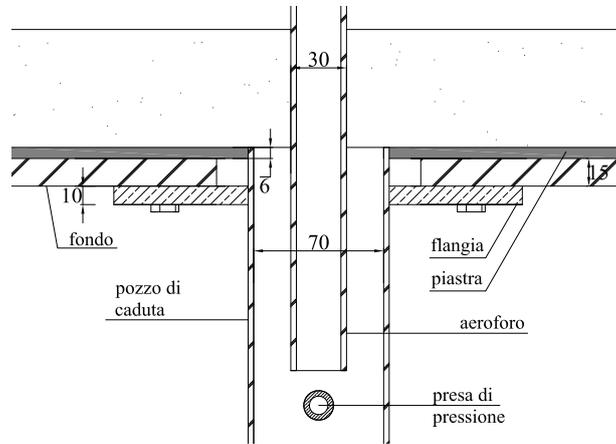


Figura 9.5: Particolare dell'imbocco: DN70 e dN30 (tutte le misure sono espresse in [mm]).

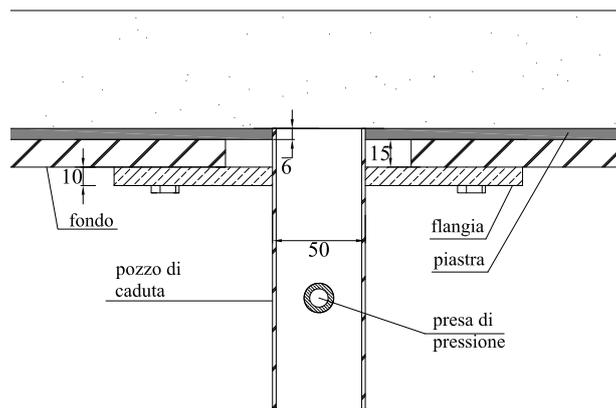


Figura 9.6: Particolare dell'imbocco: DN50 e  $d = 0$  (tutte le misure sono espresse in [mm]).

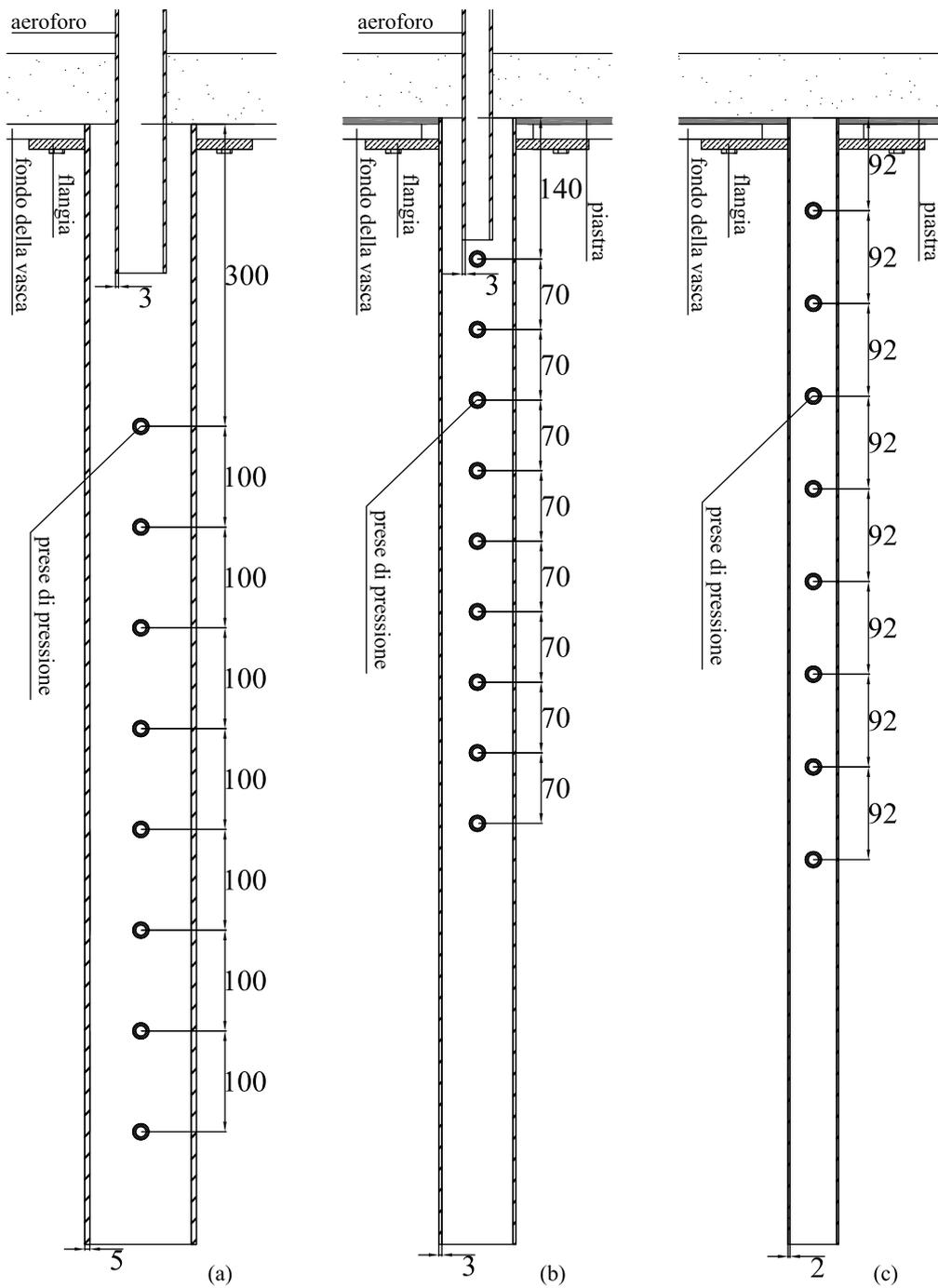


Figura 9.7: Sezione longitudinale dei tubi sperimentali: DN100 e dN50 (a); DN70 e dN30 (b) e DN50 (c). In evidenza la disposizione delle prese di pressione (tutte le misure sono espresse in [mm]).



Figura 9.8: Manometro ad acqua (a sinistra) e a mercurio (a destra) per la misura della portata inviata; in vista le condotte di alimentazione ( $\Phi 100$ ,  $\Phi 200$  e  $\Phi 300$  dal basso verso l'alto).

idrico all'interno della vasca di carico e delle pressioni lungo il tubo verticale che simula il pozzo, nonché della portata di aria in ingresso all'aeroforo quando questo è presente.

- *Misura della portata inviata.* La portata inviata all'impianto viene regolata tramite un diaframma, comandato da un volante posto sulla sommità della struttura, e misurata attraverso due manometri differenziali, uno ad acqua e l'altro a mercurio, che è possibile selezionare agendo sui rispettivi rubinetti; ciascuno strumento è costituito da due tubicini di vetro di diametro pari a 10 mm e altezza pari a 2 m, sovrapposti ad una scala metrata che consente la lettura dei livelli (Fig. 9.8). La scelta tra i due tipi di strumento dipende in buona sostanza dalla tubazione di alimentazione ( $\Phi 100$  o  $\Phi 200$ ) e dal valore di portata che si intende inviare al sistema, notando che il manometro a mercurio, dato l'elevato peso specifico di questo fluido rispetto all'acqua, permette di misurare portate maggiori con dislivelli contenuti, con un errore massimo di lettura pari a  $\pm 0.5$  mm.

Come operazione preliminare alla campagna sperimentale è stato necessario tarare la scala di deflusso di entrambi gli strumenti per entrambe le condotte di alimentazione. Ciò è stato possibile adoperando una vasca venturimetrica caratterizzata da un rapporto tra la larghezza del canale e quella del restringimento pari a 0.6 e dotata di un idrometro di ottone per la misura del livello idrico nel canale a monte del restringimento (Fig. 9.9). Per ogni valore di portata, ottenuto regolando il diaframma, la lettura del livello nel venturimetro consente di conoscere il valore della portata, poiché la scala di deflusso del venturimetro è



Figura 9.9: Vasca venturimetrica per la taratura dei manometri differenziali.

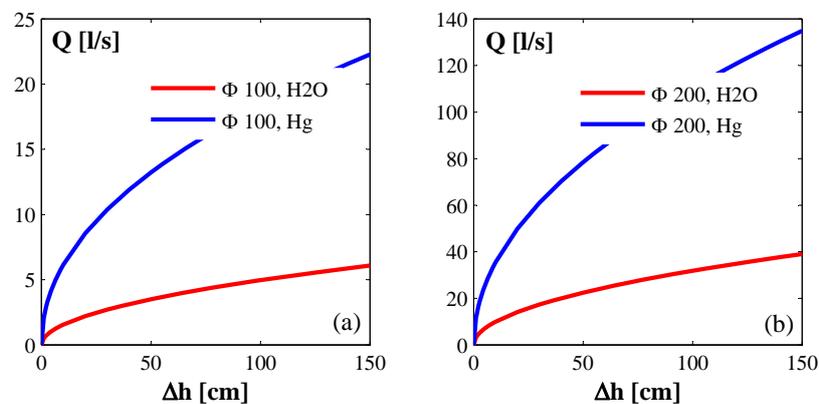


Figura 9.10: Scale di deflusso dei manometri differenziali ad acqua e a mercurio per l'alimentazione  $\Phi 100$  (a) e  $\Phi 200$  (b).

nota (Fig. 4.9); si correla dunque tale valore di portata al dislivello letto al manometro differenziale. L'applicazione di tale procedura a tutte le combinazioni condotta di alimentazione - manometro differenziale, per diversi gradi di apertura del diaframma, ha dato luogo alle scale di deflusso in Fig. 9.10.

- *Misura del livello idrico.* Al fine di misurare il livello idrico raggiunto nella vasca di carico si è adoperata un'asta metrata posizionata su una delle pareti; tale strumento è stato preferito all'idrometro a punta data la difficoltà di accesso alla sommità della vasca, in prossimità della superficie libera; l'errore massimo di lettura è pari a  $\pm 0.5$  mm.
- *Misura della pressione.* Per misurare i valori di pressione lungo il pozzo si è reso necessario l'impiego di raccordi a T che consentissero di poter scegliere tra due strumenti di misura, ovvero piezometri e vuotometri.

Nel caso di valori di pressione modesti e stabili è opportuno fare riferimento ai piezometri ad U, ciascuno costituito da due tubicini di vetro di diametro pari a 10 mm e altezza pari a 2 m, collegati tra loro a mezzo di apposite giunzioni di gomma nell'estremità inferiore, mentre all'estremità superiore il componente sinistro è a contatto con l'atmosfera e quello destro è collegato alla corrispondente presa di pressione, a mezzo di un tubicino flessibile del diametro di 6 mm e di un raccordo a T (Fig. 9.11). Tali strumenti consentono la lettura piuttosto precisa di valori stabili di altezza piezometrica, sia positiva che negativa, fino a circa 1.20 m in valore assoluto, con un errore massimo di lettura di  $\pm 0.5$  mm per ciascun componente. Tuttavia, durante la campagna sperimentale, in molti casi si è riscontrata una notevole oscillazione nei valori di pressione, nonché valori di depressione nel pozzo troppo elevati per le dimensioni dei piezometri; inoltre, l'elevata quantità di aria richiamata nel pozzo rimaneva spesso intrappolata nei tubicini flessibili di collegamento, andando a formare dei menischi d'aria la cui presenza inficiava la qualità delle successive misure. Proprio per tali motivi per ogni presa di pressione, sull'estremità libera del raccordo a T, si è montato un vuotometro di tipo Bourdon (Fig. 9.11). Tale strumento è costituito da una cassa anaerodica alimentata da una presa posta sull'attacco filettato; le variazioni di pressione rilevate dalla membrana interna producono un'espansione o una contrazione della cassa, con conseguente attivazione del cinematismo che produce il movimento della lancetta posta sul quadrante principale. I valori misurati vengono riportati su di una corona esterna, che presenta una gradazione con passo di 20 cm. Tali strumenti sono stati dunque preferiti ai piezometri solo nel caso di valori elevati di depressione (poiché il fondo scala non ne consente l'applicazione per pressioni relative positive, o negative ma di modesta entità), in caso di oscillazione dei valori e di problemi di intrappolamento di aria lungo il pozzo; l'errore massimo di lettura è pari a  $\pm 0.25$  kPa.

- *Misura della velocità dell'aria.* Per conoscere la portata di aria richiamata nel pozzo tramite il tubo aeroforo, è stato impiegato un mulinello. Tale strumento è provvisto di una piccola elica con asse di rotazione parallelo alle linee di flusso (che nel caso in esame sono verticali come l'aeroforo); la funzione di correlazione intrinseca consente di legare il numero di giri al secondo dell'elica alla velocità del fluido in esame (nel caso specifico aria), la quale a sua volta, moltiplicata per la sezione dell'aeroforo, fornisce la portata di aria richiamata nel pozzo. Lo strumento, preventivamente tarato con l'ausilio di un più preciso anemometro a filo caldo, permette di ottenere, oltre alla misura istantanea, anche un valore medio in un prefissato intervallo di tempo,

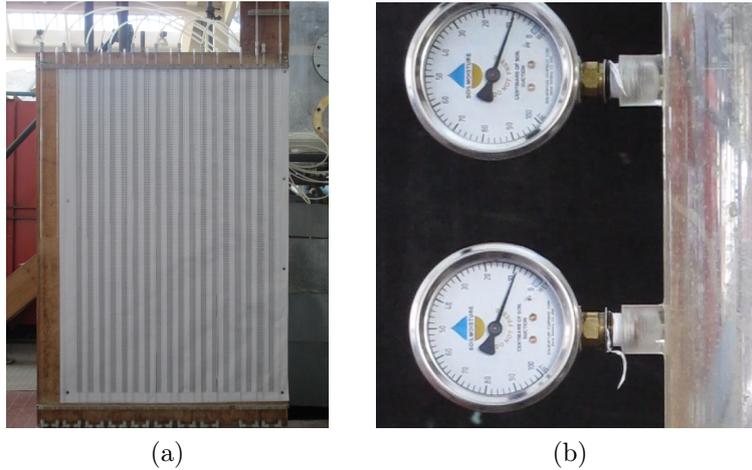


Figura 9.11: Quadro piezometrico (a) e vuotometri Bourdon (b).

nonché i valori minimo e massimo dell'intervallo. Poiché il particolare strumento in uso presenta un fondo scala di 8 m/s, in alcuni casi, ed in particolare in presenza dell'aeroforo di dimensioni minori, non è stato possibile effettuare misurazioni. Per questo strumento digitale l'errore massimo è pari a  $\pm 0.2$  m/s.

- *Misure dinamiche.* In molte circostanze, sia i valori del tirante nella vasca di carico che di pressione lungo il pozzo hanno manifestato oscillazioni; in questo caso, oltre alle misure tradizionali, si è optato per un sistema di videoacquisizione in continuo. Successivamente, tali video sono stati elaborati mediante un programma *freeware* ottenendo un campionamento ogni 10 fotogrammi; per ogni immagine campionata si è acquisita la misura oggetto di interesse al fine di ottenerne un *time plot* discretizzato.

## 9.2 Sintesi delle prove

La campagna di indagini si è articolata in sessioni sperimentali volte ciascuna a caratterizzare il comportamento idraulico di una configurazione dell'impianto, intesa come particolare combinazione di diametro del pozzo  $D$ , lunghezza del pozzo  $L$ , diametro dell'aeroforo  $d$  e grado di affondamento dell'aeroforo all'interno del pozzo  $n$ . Tipicamente, ogni sessione viene condotta a partire da una portata corrispondente al tirante massimo che è possibile ricreare in vasca, ed effettuando successive diminuzioni di portata; in alcuni casi, secondo la sensibilità dello sperimentatore, alcuni campi di portata sono stati indagati anche per successivi incrementi di portata per verificare la presenza di un eventuale fenomeno di isteresi, che si è concretizzato solo in pochissimi casi. Durante ogni sessione, scelto il diametro  $\Phi$  della

condotta di alimentazione e il tipo di manometro differenziale più adatto, si impone un valore della portata inviata all'impianto agendo sul diaframma di regolazione e leggendo il corrispondente dislivello al manometro, che fornisce immediatamente il valore della portata  $Q$  essendo nota la scala di deflusso dello strumento. Successivamente, si attende il tempo necessario affinché il livello  $h$  nella vasca di carico si stabilizzi, in genere dell'ordine di 10-20 minuti, e si procede alla sua misurazione tramite l'asta graduata posta sulla parete della vasca. Raggiunta la condizione di moto permanente si procede inoltre alla misura delle pressioni lungo il pozzo, con l'ausilio del quadro piezometrico o del sistema di vuotometri a seconda dell'entità e della natura delle pressioni sviluppatesi; se l'aeroforo è previsto nella configurazione indagata, si effettua la misura della velocità media, minima e massima dell'aria tramite il mulinello, con riferimento ad un intervallo di tempo di 5 secondi, ottenendo la portata di aria  $Q_a$ .

Per ogni sessione sperimentale la procedura finora descritta si applica, al diminuire delle portate e dei tiranti, fino al manifestarsi delle prime vorticità, che si associano a fluttuazioni del pelo libero e delle pressioni. In questi casi si rende dunque necessario il monitoraggio sincronizzato, e in continuo, sia della superficie libera nella vasca di carico che delle pressioni nei vuotometri. Al diminuire ulteriore della portata, la presenza dei vortici si associa ad una più netta oscillazione ciclica che coinvolge sia le grandezze che il comportamento idraulico dell'intero sistema; in questa fase si rende dunque ancora più necessario il monitoraggio in continuo di tiranti e pressioni. Infine, per valori di portata di piccola entità, si giunge a una nuova condizione di stabilità in cui le grandezze possono essere misurate in maniera istantanea.

Le misure effettuate, in particolare quelle legate ai tiranti e alle portate, hanno lo scopo ultimo di fornire indicazioni circa la scala di deflusso del pozzo di caduta, ovvero una relazione che permetta di correlare le caratteristiche geometriche dell'impianto al valore di portata che si intende far defluire. Le misure riguardanti la pressione e la portata d'aria hanno il compito di fornire una conoscenza più approfondita del regime di deflusso all'interno del tubo, oltre che quello di rendere palesi le problematiche legate alla formazione di vortici per effetto dei valori estremamente elevati di depressione che si possono raggiungere in determinate circostanze. L'analisi visiva delle videorilevazioni consente infine di effettuare una stima della frequenza di apparizione dei vortici, con particolare riferimento alla condizione di vortice completamente sviluppato, nonché di trarre indicazioni circa la sommergenza critica di ognuna delle configurazioni esaminate.

In totale, sono state effettuate 722 prove sperimentali per un totale di 70 configurazioni, delle quali quelle caratterizzate da  $L \geq 0.5$  m hanno rilevanza tecnica ai fini della progettazione di un manufatto di caduta, mentre le restanti sono prove di completamento atte a chiarire alcuni aspetti idraulici del fenomeno oggetto di studio. In Tab. 9.1 sono riportate le caratteristiche

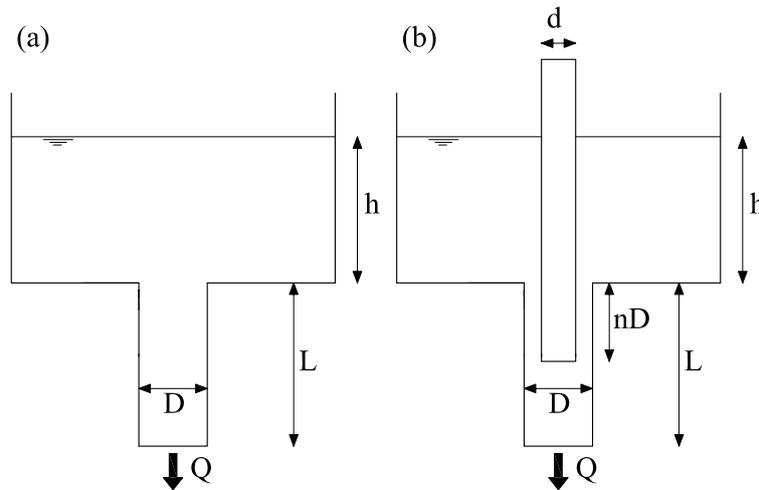


Figura 9.12: Variabili della sperimentazione in assenza (a) e in presenza (b) di aeroforo.

dei tubi in Plexiglas usati per simulare sia il pozzo che l'aeroforo, mentre in Tab. 9.2 sono riportate le diverse lunghezze sperimentate, nominali ed effettive; in Tab. 9.3 è infine presentata una sintesi degli esperimenti effettuati (si noti che la dicitura  $n = 0$  implica l'affondamento minimo necessario per garantire il corretto posizionamento e bloccaggio dell'aeroforo in corrispondenza dell'imbocco del pozzo). In Fig. 9.12 è illustrato schematicamente il funzionamento del sistema, con le variabili oggetto di studio in evidenza: il tirante in vasca  $h$ , la lunghezza del pozzo  $L$ , il diametro del pozzo  $D$  e quello dell'aeroforo  $d$ , l'affondamento dell'aeroforo  $nD$  con  $n$  numero intero.

Tabella 9.1: Diametro nominale, interno, esterno e spessore dei tubi sperimentali.

(a) Diametri sperimentali per il pozzo			(b) Diametri sperimentali per l'aeroforo		
DN [mm]	$D_{int}$ [mm]	$s$ [mm]	dN [mm]	$d_{est}$ [mm]	$s$ [mm]
100	100	5	70	70	3
70	70	3	50	50	3
50	46	2	30	30	3

Al fine di trattare in maniera unificata i dati relativi sia alle configurazioni semplici sia a quelle dotate di aeroforo, è opportuno introdurre ulteriori variabili. Innanzitutto, è utile considerare che in presenza di aeroforo è stato osservato che la regione in cui si estende il *full flow* non è l'intera estensione del pozzo, bensì solo la porzione occupata dall'aeroforo; al di sotto, infatti, è presente una miscela di acqua e aria a pressione atmosferica. Convieni

Tabella 9.2: Lunghezze nominali.

LN [m]	DN [mm]	$L$ effettiva [m]
1.5	100	1.47
1.5	70	1.45
1.5	50	1.45
1	100	1
1	70	1
1	50	1
0.5	100	0.5
0.5	70	0.5
0.5	50	0.5
0.2	100	0.2
0.2	70	0.21
0.2	50	-
0.15	100	-
0.15	70	0.14
0.15	50	0.135
0.1	100	0.1
0.1	70	-
0.1	50	0.09

quindi introdurre una variabile  $L_{full}$ , rappresentativa dell'estensione del *full flow*, pari a  $L$  in assenza di aeroforo e a  $nD$  in assenza di questo.

Per quanto concerne la sezione, si ricorda che in presenza del tubo coassiale la sezione idrica è una corona circolare di area pari a  $\pi(D^2 - d^2)/4$  con  $D$  il diametro interno del pozzo e  $d$  il diametro esterno dell'aeroforo; si può dunque definire un diametro equivalente  $D_{eq}$ :

$$D_{eq} = \sqrt{D^2 - d^2} \quad (9.1)$$

per cui in ogni caso risulta  $\sigma = \pi D_{eq}^2/4$ . Si ricorda inoltre che in una corona circolare il perimetro bagnato  $\chi$  è dato dalla somma dei perimetri interno ed esterno, poiché gli sforzi tangenziali si esplicano su entrambe le superfici; l'espressione del raggio idraulico  $R$  risulta:

$$R = \frac{\sigma}{\chi} = \frac{\pi(D^2 - d^2)/4}{\pi(D + d)} = \frac{(D + d)(D - d)}{4(D + d)} = \frac{D - d}{4} \quad (9.2)$$

che è una relazione applicabile anche in caso di sezione circolare, per la quale risulta  $R = D/4$ . È inoltre conveniente esprimere il numero di Reynolds con la seguente:

$$Re = \frac{4RV}{\nu} \quad (9.3)$$

che è parimenti applicabile ad una sezione circolare, per la quale fornisce  $Re = VD/\nu$ .

Tabella 9.3: Sintesi delle configurazioni sperimentate.

id	DN [mm]	dN [mm]	LN [m]	$n$	$L_{full}$ [m]	id	DN [mm]	dN [mm]	LN [m]	$n$	$L_{full}$ [m]
1	100	0	1.5	0	1.47	36	100	30	0.5	2	0.21
2	100	70	1.5	1	0.1	37	100	30	0.5	0	0.4
3	100	70	1.5	2	0.2	38	100	0	0.5	0	0
4	100	70	1.5	7	0.7	39	100	0	0.2	0	0
5	100	70	1.5	6	0.6	40	70	0	1.5	0	1.45
6	100	70	1.5	5	0.5	41	70	50	1.5	10	0.7
7	100	70	1.5	3	0.3	42	70	50	1.5	7	0.49
8	100	70	1.5	0	0.045	43	70	50	1.5	3	0.21
9	100	50	1.5	7	0.7	44	70	30	1.5	3	0.21
10	100	50	1.5	5	0.5	45	70	30	1.5	6	0.42
11	100	50	1.5	3	0.3	46	70	30	1.5	9	0.63
12	100	50	1.5	1	0.1	47	70	0	1	0	0
13	100	50	1.5	0	0.033	48	70	50	1	9	0.63
14	100	50	1.5	6	0.6	49	70	50	1	5	0.35
15	100	50	1.5	4	0.4	50	70	30	1	9	0.63
16	100	50	1.5	2	0.2	51	70	30	1	6	0.42
17	100	50	1.5	0	0.048	52	70	30	1	3	0.21
18	100	70	1	7	0.7	53	70	0	0.5	0	0
19	100	70	1	4	0.4	54	70	50	0.5	7	0.49
20	100	70	1	2	0.2	55	70	50	0.5	3	0.21
21	100	70	1	0	0.045	56	70	30	0.5	6	0.42
22	100	50	1	7	0.7	57	70	30	0.5	3	0.21
23	100	50	1	4	0.4	58	70	0	0.2	0	0
24	100	50	1	2	0.2	59	50	0	1.5	0	0
25	100	50	1	0	0.026	60	50	0	1	0	0
26	100	50	1	6	0.6	61	50	0	0.5	0	0
27	100	30	1	4	0.4	62	50	0	0.15	0	0
28	100	30	1	2	0.2	63	100	0	0	0	0
29	100	30	1	0	0.032	64	100	70	0.5	5	0
30	100	0	1	0	0	65	100	70	0.5	0	0
31	100	70	0.5	2	0.2	66	0	0	0.1	0	0
32	100	50	0.5	5	0.5	67	70	0	0.15	0	0
33	100	50	0.5	2	0.2	68	70	0	0	0	0
34	100	50	0.5	0	0.039	69	50	0	0.1	0	0
35	100	30	0.5	5	0.5	70	50	0	0	0	0

# Capitolo 10

## Analisi dei dati

Agli ingegneri piace risolvere i problemi. Se non ci sono problemi sottomano, gli ingegneri li creeranno.

---

Scott Adams  
(*Il principio di Dilbert*, 1996)

Al variare di portate e tiranti all'interno del pozzo sono state osservate diverse condizioni di deflusso, ed in particolare, in accordo con lo stato dell'arte, una condizione cosiddetta di *full flow* per portate e tiranti molto elevati e una condizione di *weir flow* per tiranti e portate molto modesti.

La condizione di *full flow* è caratterizzata dalla presenza di un regime di pressurizzazione all'interno del pozzo, che si presenta dunque completamente occupato dal fluido senza manifestare visibile intrappolamento di aria; a ciò corrisponde una condizione di generale stabilità delle grandezze oggetto di studio ed in particolare tiranti e pressioni, che possono dunque essere misurati in maniera istantanea. All'imbocco del manufatto di caduta, inoltre, non è visibile alcuna contrazione, tranne che in un numero ristretto di casi in cui la presenza di un vortice completamente sviluppato e di considerevoli dimensioni ha determinato l'insorgere di una sezione contratta; tuttavia la lievissima, conseguente variazione di tirante dovuta all'istantanea modifica della sezione idrica si è rivelata di fatto trascurabile ai fini della scala di deflusso, che non ne risulta mai alterata.

La condizione di *weir flow* è, secondo letteratura, caratterizzata dal distacco di un getto di forma anulare dall'imbocco del pozzo, le cui pareti, ed in particolare quelle interne, sono a contatto con l'atmosfera e dunque soggette ad una pressione relativa nulla. Durante la campagna sperimentale, seppure si sia verificato che in questa particolare condizione di deflusso le pressioni lungo il pozzo sono sempre circa pari alla pressione atmosferica,

la forma del getto è lungi dall'essere di forma anulare, poiché si è sempre manifestato in questa fase un vortice del tipo *free surface vortex*. Tale vortice presenta uno spazio centrale libero di diametro confrontabile con quello del pozzo, che permette agevolmente l'ingresso di aria all'interno del pozzo garantendo la presenza di pressione atmosferica per tutta la lunghezza; tuttavia, il vortice stesso determina l'ingresso dei filetti fluidi nel manufatto attraverso un moto di tipo elicoidale, che si mantiene tale per una considerevole distanza dall'imbocco, determinando un intrappolamento di aria nel fluido più caotico rispetto alla condizione teorizzata in letteratura. Infine, è quasi sempre visibile un fenomeno di contrazione dei filetti fluidi in corrispondenza dell'imbocco, tranne in pochi casi in cui l'elevata dimensione del vortice centrale, unita alle ridotte dimensioni del pozzo in esame, ne ha causato la soppressione.

La maggioranza dei lavori trattati nello stato dell'arte prevede la presenza di un *orifice flow* che funga da transizione tra il *full flow* e il *weir flow*, in cui il parametro di controllo del deflusso risulta essere la sezione del pozzo. La campagna sperimentale è invece risultata coerente con quei pochi lavori sperimentali in cui la transizione tra i due stati estremi si è manifestata sottoforma di alternanza ciclica tra le due condizioni di deflusso; pertanto, si farà riferimento ad un generico *transitional flow*. Durante tale fase, partendo ad esempio da un istante in cui si manifesta la condizione di *full flow* con il pozzo in regime di pressurizzazione e assenza di sezione contratta, il tirante si riduce nel tempo fino a un minimo, in corrispondenza del quale il pozzo improvvisamente si svuota, le pressioni si annullano e diventa visibile il fenomeno di contrazione; il tirante aumenta nel tempo in conseguenza della riduzione di sezione, fino a un massimo in corrispondenza del quale si ripristina la pressurizzazione, le pressioni manifestano valori diversi da zero e scompare la sezione contratta, cosicché il tirante ricomincia a decrescere e un nuovo "ciclo" può iniziare. Nel *transitional flow*, inoltre, sono spesso visibili vortici, in tutti i possibili stadi di evoluzione; è presumibilmente proprio attraverso tali vortici che ha luogo l'intrappolamento di aria che innesca il passaggio da *full flow* a *weir flow* durante l'oscillazione. Proprio la presenza di questa oscillazione fa insorgere la necessità di monitorare le grandezze oggetto di studio, ed in particolare i tiranti, nel tempo, al fine di ottenerne dei valori caratteristici (massimo, medio, minimo).

I meccanismi di deflusso sono visibili, come da letteratura, nella forma della scala di deflusso, intesa come diagramma che vede le portate inviate al sistema  $Q$  sull'asse delle ascisse e i tiranti in vasca  $h$  sull'asse delle ordinate.

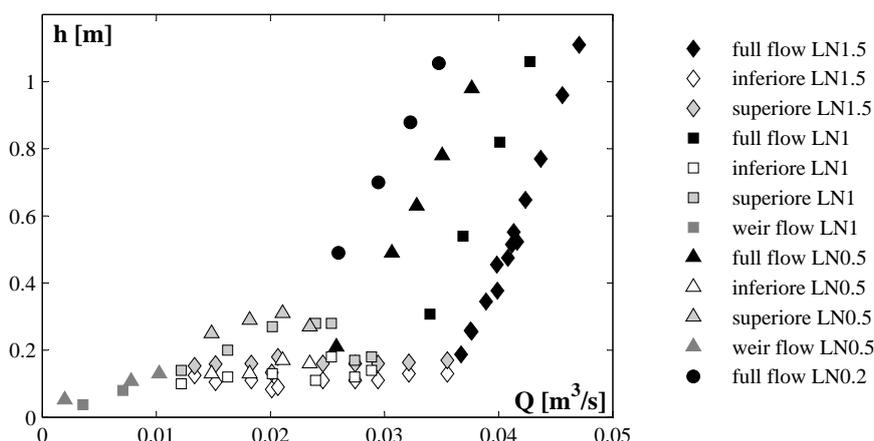


Figura 10.1: Scale di deflusso per le configurazioni 1, 30, 38 e 39 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN100,  $d = 0$  mm,  $n = 0$ .

## 10.1 Configurazioni prive di aeroforo

Nelle Figg. 10.1, 10.2 e 10.3 sono riportate le scale di deflusso relative ai tre diametri previsti per il pozzo, al variare della lunghezza. Il tratto distintivo di tali scale di deflusso, che si riscontrerà per tutte le configurazioni sperimentate, consiste in una duplicità di comportamento: nella fattispecie, è possibile individuare un ramo superiore in cui ad una piccola variazione di portata segue una considerevole variazione di carico, e un ramo inferiore in cui accade invece l'opposto. Tale differenza di forma trova una giustificazione delle diverse modalità di deflusso precedentemente illustrate: il ramo superiore corrisponde al regime di *full flow*, mentre il ramo inferiore è costituito dai punti sperimentali che hanno manifestato sia un comportamento del tipo *weir flow* che *transitional flow*; per questi ultimi, in particolare, si è fatto riferimento ai valori massimi e minimi, che vanno dunque a formare rispettivamente il limite superiore e inferiore di una fascia di variazione.

È possibile notare che qualunque sia il diametro del pozzo i rami superiori si distinguono nettamente al variare della lunghezza, mentre le curve costituenti i rami inferiori sono molto più ravvicinate, e tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più è piccolo il diametro del pozzo. Si nota infatti come in Fig. 10.1 la fascia di variazione del *transitional flow* sia alquanto larga, mentre la sua ampiezza appare ristretta in Fig. 10.2 e ancora più in Fig. 10.3. Con riferimento al ramo superiore, si può notare come, per un valore medio del tirante pari a 60 cm, al diminuire della lunghezza si abbia una riduzione della portata rispetto al valore corrispondente alla lunghezza massima rispettivamente del 10%, 23% e 33% per il DN100, del 9%, 24% e 31% per il DN70 e del 6%, 19% e 28% per il DN50.

In Fig. 10.4 sono invece riportate le scale di deflusso in *full flow* relative

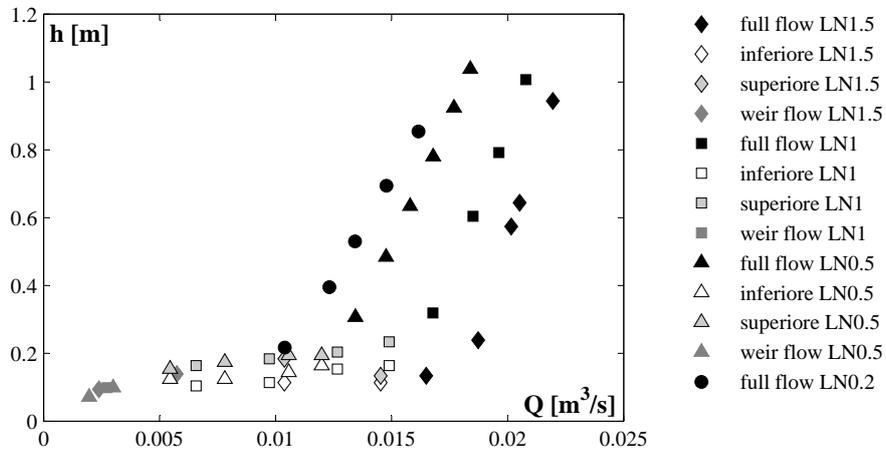


Figura 10.2: Scale di deflusso per le configurazioni 40, 47, 53 e 58 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN70,  $d = 0$  mm,  $n = 0$ .

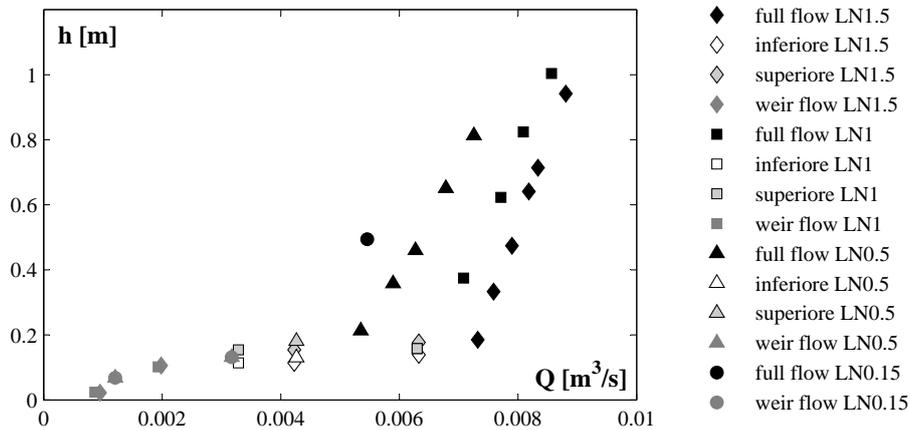


Figura 10.3: Scale di deflusso per le configurazioni 59, 60, 61 e 62 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN50,  $d = 0$  mm,  $n = 0$ .

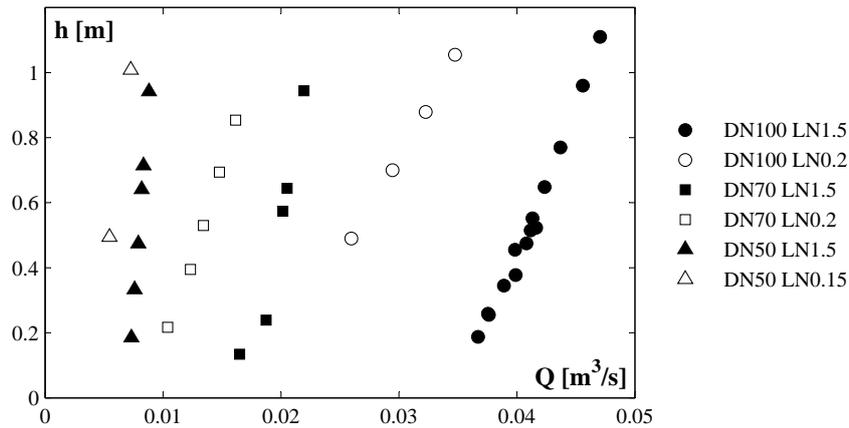


Figura 10.4: Scale di deflusso per le configurazioni 1, 39, 40, 58, 59 e 62:  $d = 0$  mm,  $n = 0$ .

alle lunghezze estreme per i tre diametri sperimentali; tale rappresentazione permette di apprezzare come al diminuire del diametro, muovendo cioè da destra verso sinistra, la variazione di lunghezza risulti incidere sempre meno, come testimoniato dallo spazio via via più ristretto tra le curve relative allo stesso diametro. Si nota dunque una riduzione della portata, rispetto al valore massimo riscontrato con un tirante di 60 cm, pari al 33%, 51%, 67%, 81% e 86% spostandosi da destra verso sinistra.

## 10.2 Configurazioni dotate di aeroforo

In Fig. 10.5 sono mostrate le scale di deflusso relative al pozzo di diametro DN100 al cui interno è inserito l'aeroforo dN70. Dall'analisi del regime di *full flow* si nota come, a parità di tirante, la portata diminuisca in maniera estremamente significativa rispetto alla configurazione con stesse proprietà ma priva di aeroforo, per effetto della forte riduzione della sezione utile; inoltre, la diminuzione di capacità è tanto maggiore quanto minore è l'affondamento dell'aeroforo all'interno del pozzo. In termini percentuali, per un tirante pari a 60 cm, si ha una riduzione della portata rispetto alla stessa configurazione priva di aeroforo, al diminuire del grado di affondamento, pari al 67%, 68%, 69%, 70%, 73%, 74.8% e 75%; da questi numeri è evidente che, nel confronto con la configurazione priva di aeroforo, l'influenza dell'affondamento nella riduzione di capacità è comunque modesta. Per quanto riguarda invece il ramo inferiore, si nota come al variare dell'affondamento i punti relativi alla condizione di tirante massimo e quelli di minimo si allineino lungo due curve nettamente diverse.

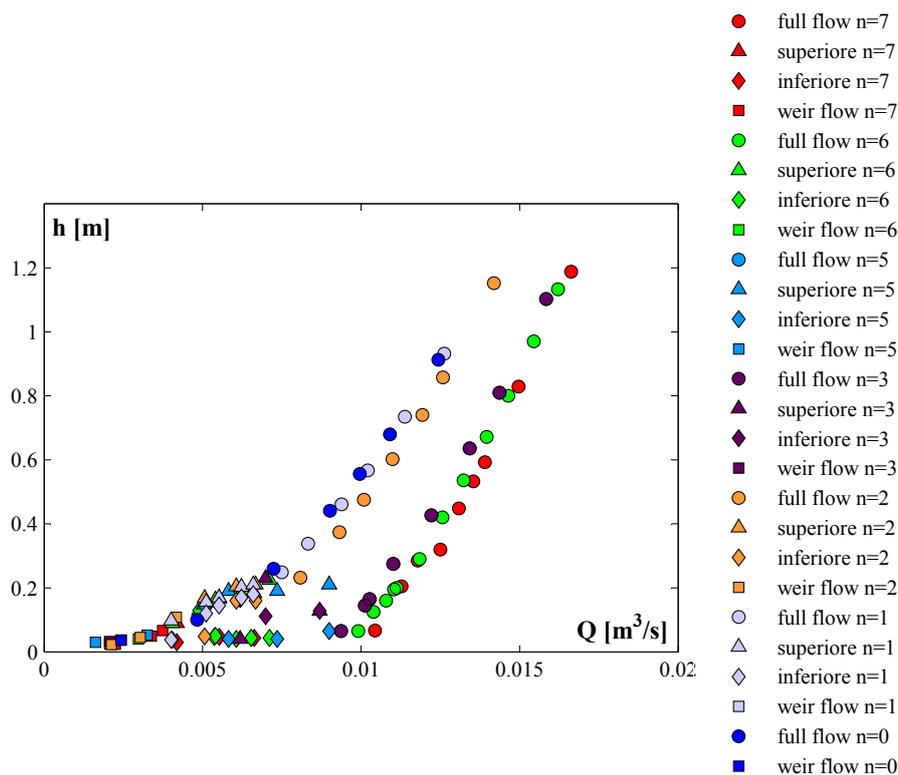


Figura 10.5: Scale di deflusso per le configurazioni 4, 5, 6, 7, 3, 2 e 8 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN70.

La riduzione della sezione, con conseguente riduzione della capacità del manufatto, è chiaramente meno evidente quando nel pozzo sono inseriti aerofori di diametro inferiore, ovvero il dN50 e il dN30, come si può notare valutando il regime di *full flow* nelle Figg. 10.6 e 10.7. Per la combinazione DN100 dN50 si ha una riduzione della portata rispetto alla stessa configurazione priva di aeroforo, per un tirante pari a 60 cm, pari al 47%, 50%, 54%, 59% e 67% da  $n = 7$  a  $n = 0$ , mentre per la combinazione DN100 dN30 la riduzione è del 38%, 39%, 43% e 48% da  $n = 6$  a  $n = 0$ . Nella Fig. 10.8 la scala di deflusso in *full flow* della configurazione caratterizzata da DN100 e LN1.5 è confrontata alle scale di deflusso relative agli affondamenti estremi in presenza dei tre aerofori dN70, dN50 e dN30. Si può notare come la portata diminuisca, a parità di tirante, con la riduzione della sezione utile al deflusso; i campi di variabilità osservati per le tre combinazioni sono quasi tangenti, con le scale di deflusso ad affondamento minimo di ciascun aeroforo pressapoco coincidenti con con le scale ad affondamento massimo dell'aeroforo di diametro maggiore. Per quanto riguarda invece i rami inferiori delle scale di deflusso, si nota come le fasce di variazione nelle Figg. 10.6 e 10.7 abbiano in sostanza la stessa ampiezza di Fig. 10.5, anche se si verifica una

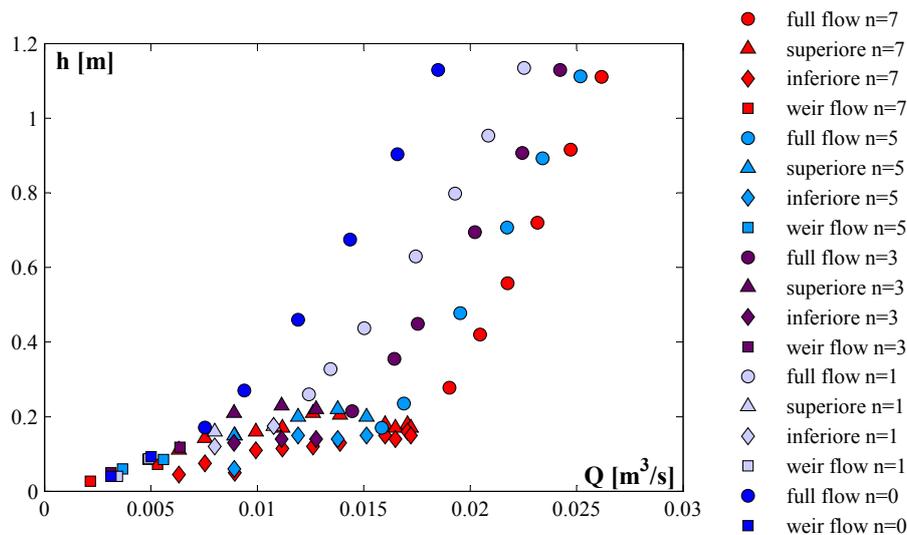


Figura 10.6: Scale di deflusso per le configurazioni 9, 10, 11, 12 e 13 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN50.

maggiore dispersione dei punti.

Quanto finora esposto, mostrato per una lunghezza del pozzo pari a 1.5 m, si ripete sistematicamente per le altre lunghezze sperimentate. Nelle Figg. 10.9, 10.10 e 10.11 sono mostrate le scale di deflusso sperimentali di un pozzo di diametro DN100 e lunghezza LN1, in presenza rispettivamente degli aerofori dN70, dN50 e dN30. Per l'aeroforo dN70, la riduzione di portata rispetto alla condizione  $d = 0$ , per un tirante medio di 60 cm, è del 63%, 66%, 68% e 75% muovendo da  $n = 7$  a  $n = 0$  (Fig. 10.9); in presenza di d50 la riduzione è del 55%, 49%, 45% e 39% da  $n = 7$  a  $n = 0$  (Fig. 10.10); per l'aeroforo d30, infine, la riduzione è del 41%, 35%, 33% e 32% da  $n = 6$  a  $n = 0$ . In Fig. 10.12 è invece mostrato il confronto tra le scale di deflusso relative agli affondamenti estremi per i tre aerofori e la configurazione caratterizzata da DN100 e LN1 priva di aeroforo. È inoltre possibile notare come, al diminuire dell'affondamento, qualunque siano i valori di DN, LN e dN, la distinzione tra il ramo inferiore e quello superiore si faccia sempre meno netto, fino a sparire quasi del tutto nelle configurazioni caratterizzate da  $n = 0$ .

In Figg. 10.13 e 10.14 sono infine mostrate tutte le scale di deflusso sperimentate che si riferiscono al pozzo di lunghezza LN0.5 in presenza di aeroforo; in queste condizioni è risultato impossibile analizzare gradi di affondamento elevati per via della ridotta estensione del pozzo. In Fig.10.13 la riduzione di portata per  $h = 60$  cm rispetto alla condizione  $d = 0$ , muovendo da sinistra verso destra, è del 61%, 48%, 42%, 34%, mentre in Fig. 10.14, muovendo da sinistra verso destra (ovvero da valori bassi a valori alti di

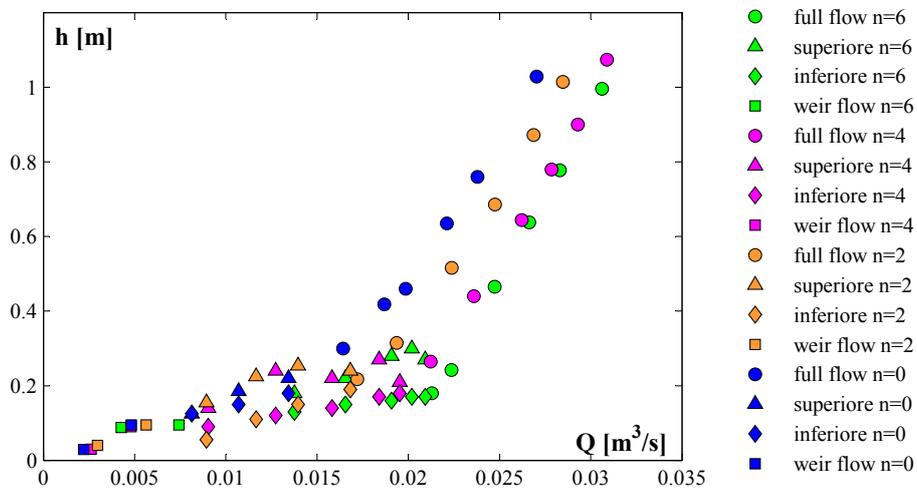


Figura 10.7: Scale di deflusso per le configurazioni 14, 15, 16 e 17 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN30.

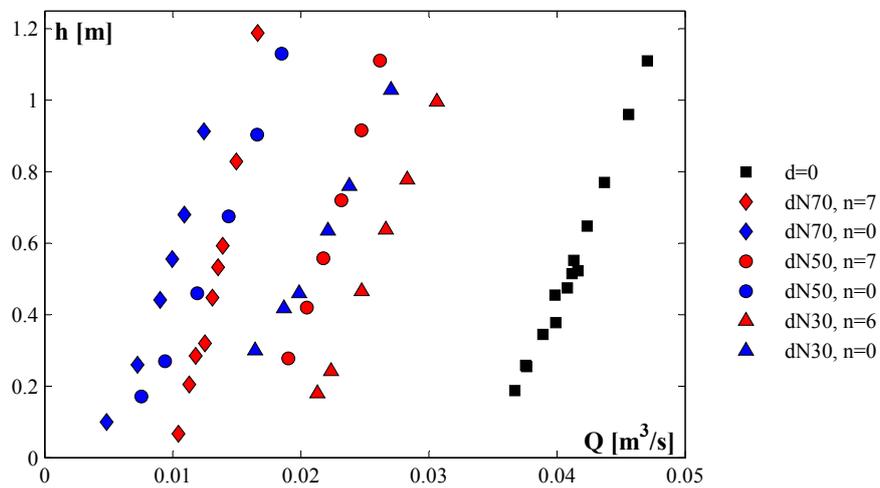


Figura 10.8: Scale di deflusso per le configurazioni 1, 14, 17, 9, 13, 4 e 8: DN100, LN1.5.

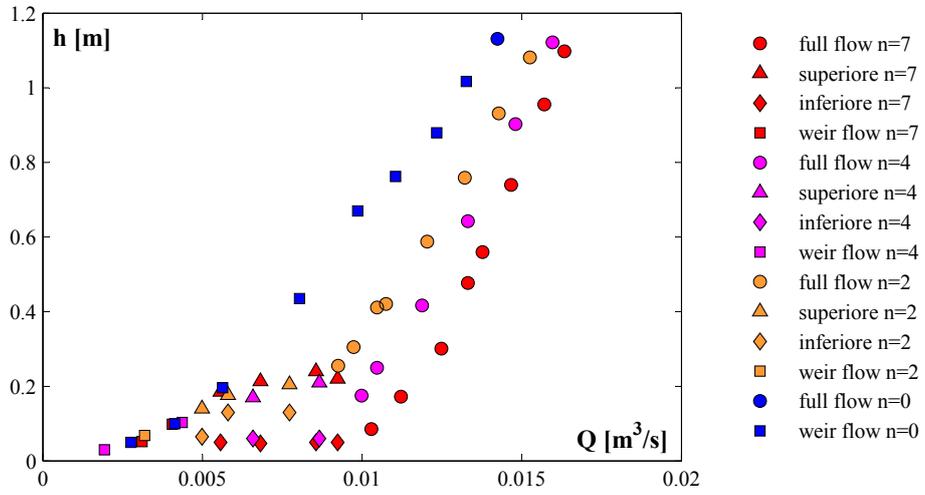


Figura 10.9: Scale di deflusso per le configurazioni 18, 19, 20 e 21 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN70, LN1.

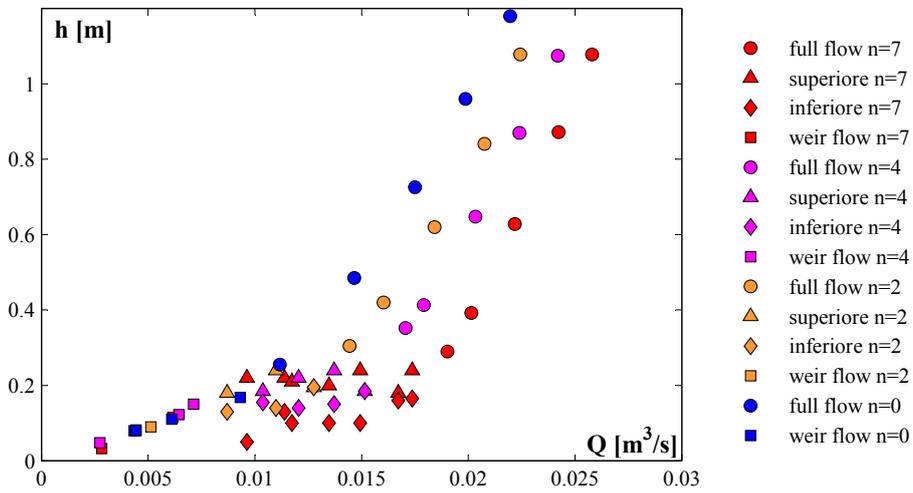


Figura 10.10: Scale di deflusso per le configurazioni 22, 23, 24 e 25 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN50, LN1.

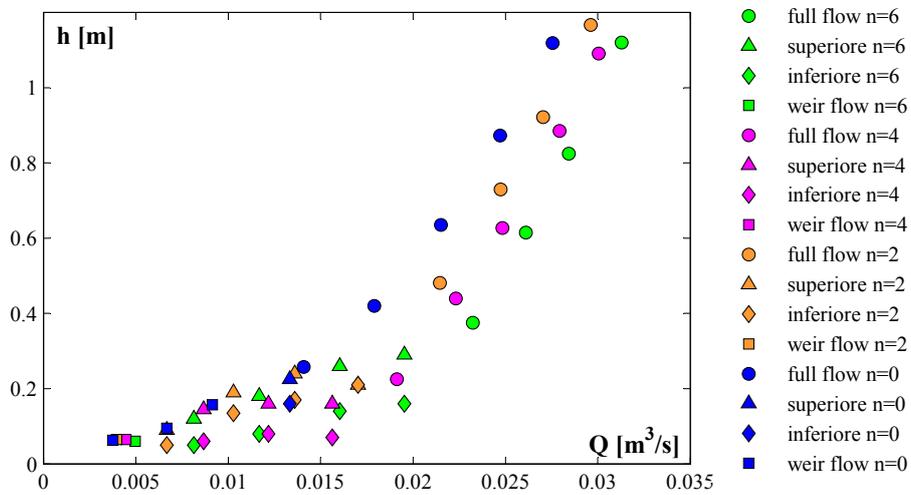


Figura 10.11: Scale di deflusso per le configurazioni 26, 27, 28 e 29 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN30, LN1.

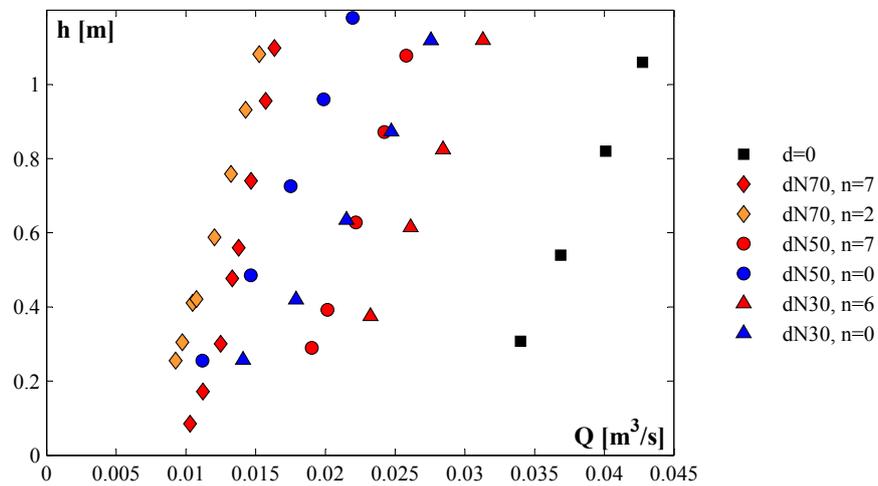


Figura 10.12: Scale di deflusso per le configurazioni 30, 26, 29, 22, 25, 18 e 21: DN100, LN1.

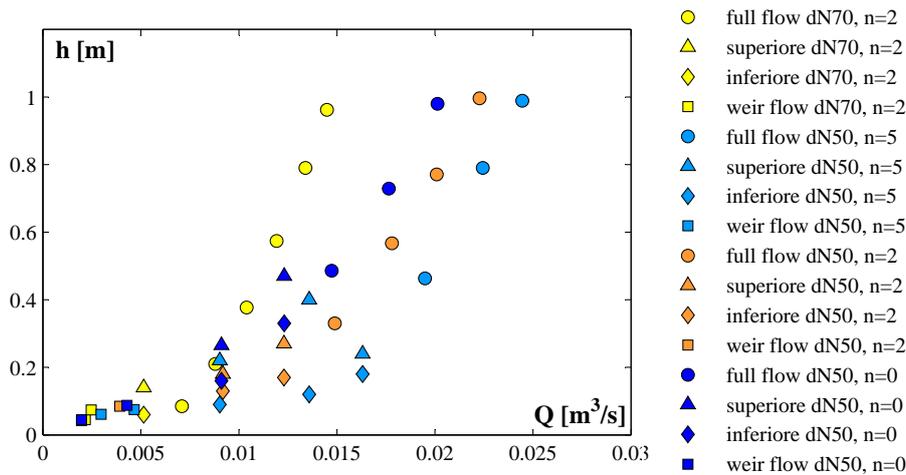


Figura 10.13: Scale di deflusso per le configurazioni 32, 33, 34 e 31: DN100, LN0.5.

affondamento), è del 35%, 28% e 20%.

Come già evidenziato nelle Figg. 10.2 e 10.3, al ridursi del diametro del pozzo si verifica una naturale riduzione della capacità del manufatto, ancora una volta per effetto della riduzione della sezione utile al deflusso. Analogamente a quanto mostrato per il diametro DN100, tale riduzione si accentua in presenza degli aerofori. Tuttavia è stato possibile verificare ciò solo per il DN70, poiché l'inserimento di un qualsiasi aeroforo a disposizione nel DN50 avrebbe comportato effetti di scala non trascurabili a causa della sezione idrica eccessivamente ridotta. In Figg. 10.15 e 10.16 sono mostrate le scale di deflusso per il pozzo di diametro DN70 e LN1.5, in presenza degli aerofori dN70 e dN50, al variare dell'affondamento, mentre le Figg. 10.17, 10.18, 10.19 e 10.20 rappresentano le stesse relazioni relative però alle lunghezze LN1 e LN0.5. In Fig. 10.15 la riduzione di portata rispetto alla condizione  $d = 0$ , per un tirante pari a 60 cm, è del 74%, 72% e 70% muovendo da bassi ad alti affondamenti; in Fig. 10.16 è del 56%, 52% e 47%; in Fig. 10.17 è del 68% e 65%; in Fig. 10.18 è del 46%, 43% e 39%; in Fig. 10.19 è del 63% e 58%; in Fig. 10.20 è del 37% e 32%. Si nota dunque in ogni caso che l'influenza dell'affondamento è maggiore quanto maggiore è la sezione idrica.

Si può inoltre notare che in presenza di DN70 e DN50 le fasce di variabilità relativa al ramo inferiore della scala di deflusso risultano tanto più strette quanto minori sono il diametro e la lunghezza del pozzo.

Si osserva infine come le configurazioni dotate di aeroforo non risentono della lunghezza del pozzo; nelle Figg. 10.21 e 10.22 si può infatti vedere che le scale di deflusso relative a configurazioni dotate di stessi DN, dN e  $n$  si sovrappongono perfettamente per qualunque valore di LN. Ciò è confermato dall'osservazione sperimentale che, in presenza di aeroforo, il regime di *full*

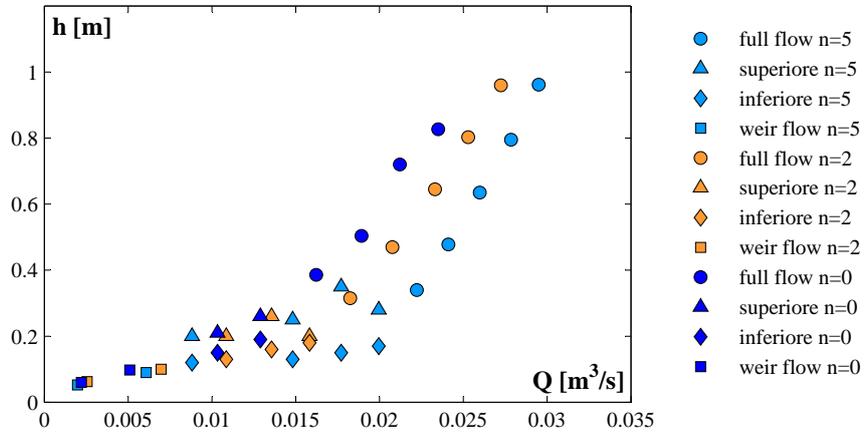


Figura 10.14: Scale di deflusso per le configurazioni 35, 36 e 37: DN100, dN30, LN0.5.

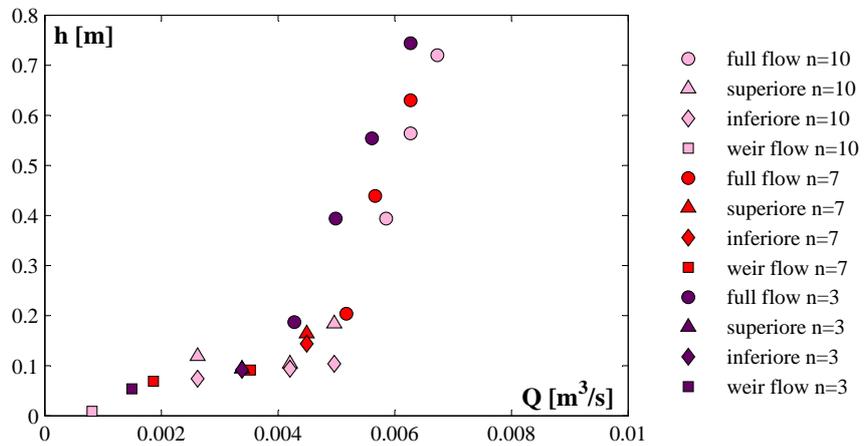


Figura 10.15: Scale di deflusso per le configurazioni 41, 42 e 43: DN70, dN50, LN1.5.

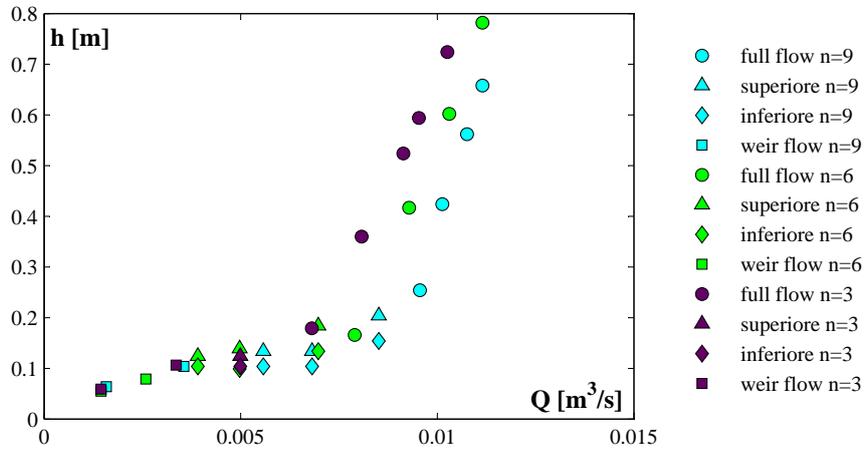


Figura 10.16: Scale di deflusso per le configurazioni 46, 45 e 44: DN70, dN30, LN1.5.

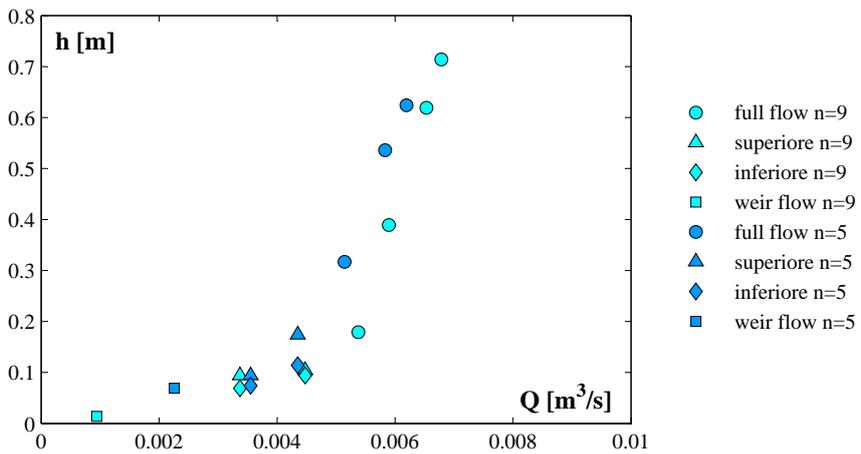


Figura 10.17: Scale di deflusso per le configurazioni 48 e 49: DN70, dN50, LN1.

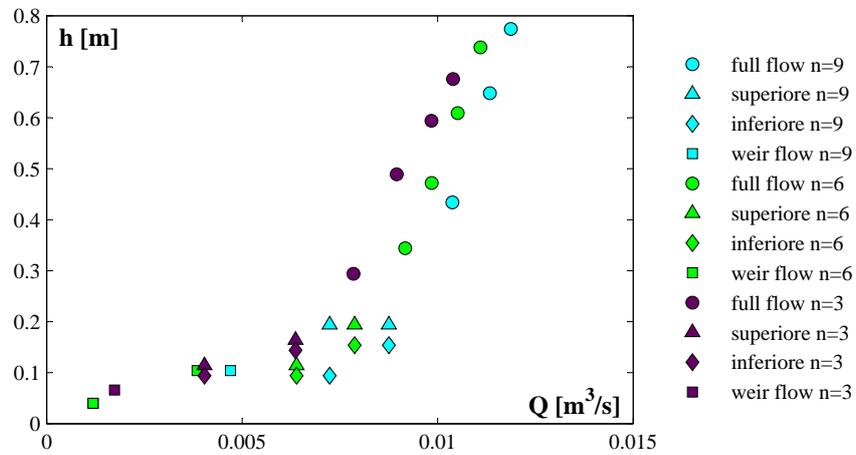


Figura 10.18: Scale di deflusso per le configurazioni 50, 51 e 52: DN70, dN30, LN1.

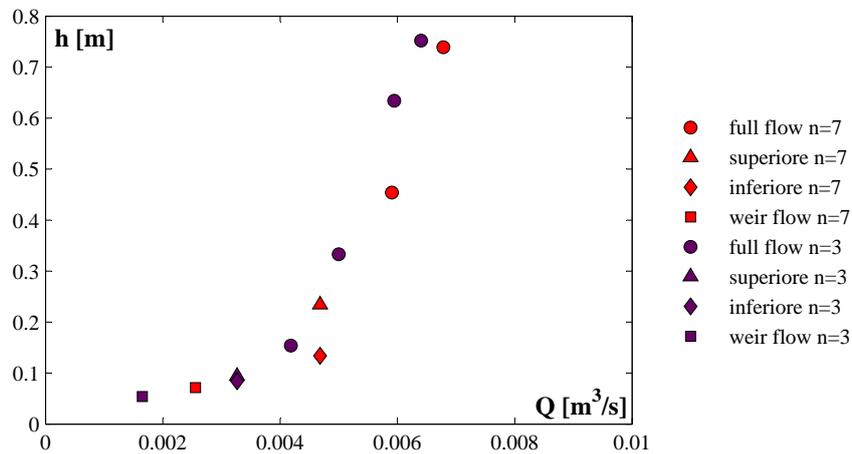


Figura 10.19: Scale di deflusso per le configurazioni 54 e 55: DN70, dN50, LN0.5.

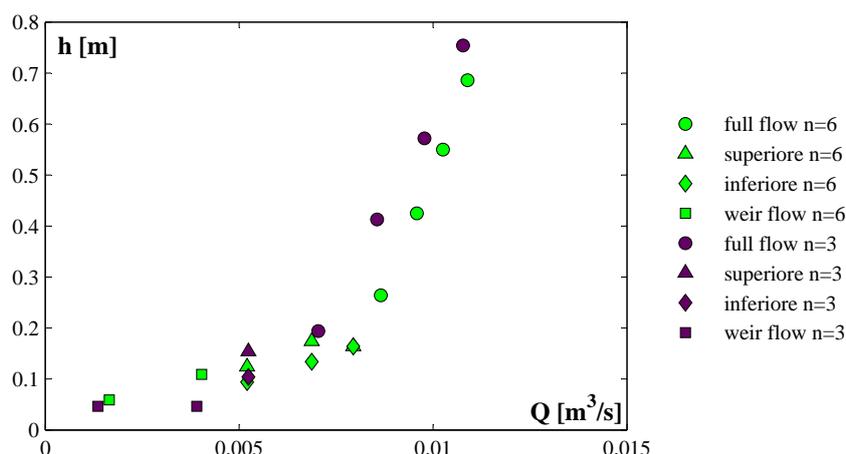


Figura 10.20: Scale di deflusso per le configurazioni 56 e 57: DN70, dN30, LN0.5.

*flow* ha un'estensione pari solo all'affondamento, e non all'intera lunghezza del pozzo.

### 10.3 Sintesi delle osservazioni

In definitiva, le scale di deflusso sperimentali mostrano come, in regime di *full flow*, a parità di tirante la portata aumenti con la sezione utile (che dipende sia dal diametro del pozzo che da quello dell'aeroforo), con la lunghezza del pozzo se è assente l'aeroforo e con l'affondamento se questo è presente. In tutti i casi, la scala di deflusso è articolata in un ramo superiore corrispondente al regime di *full flow*, e in un ramo inferiore che include sia il regime di *weir flow* che di *transitional flow*; quest'ultimo presenta una fascia di variabilità che è tanto più ampia quanto maggiori sono la sezione e la lunghezza del pozzo, oppure l'affondamento dell'aeroforo se presente. Per semplicità di notazione, nel testo si farà riferimento al ramo superiore e a quello inferiore della scala di deflusso rispettivamente con il termine di *full flow* e *non full flow*; tali regimi verranno analizzati separatamente.

### 10.4 *Borda free flow*

In aggiunta alle configurazioni già illustrate, si è deciso di indagare la possibilità di ricreare nel pozzo una condizione di *Borda free flow*; tale meccanismo di deflusso, paragonabile all'efflusso da un tubo addizionale esterno sotto carichi molto elevati, è caratterizzato dal distacco di un getto cilindrico che non interagisce in alcun modo con le pareti del pozzo, essendo le sue pareti sempre a contatto con l'atmosfera. In altre parole, si tratta di un sempli-

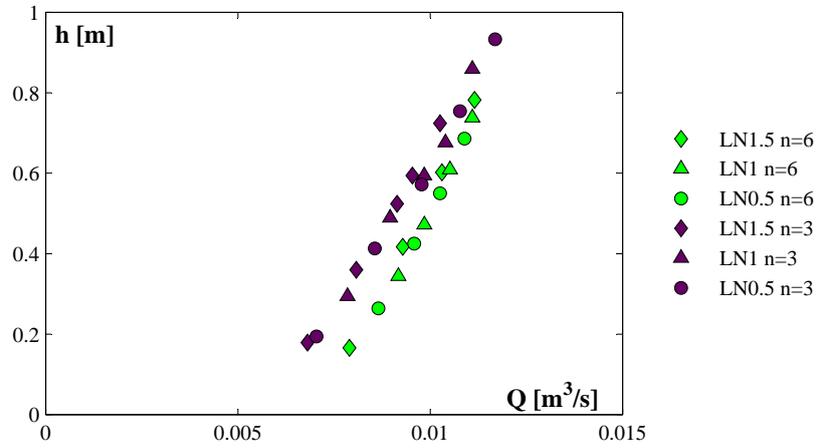


Figura 10.21: Scale di deflusso per le configurazioni 56, 52, 45, 57, 52 e 44: DN70, dN30.

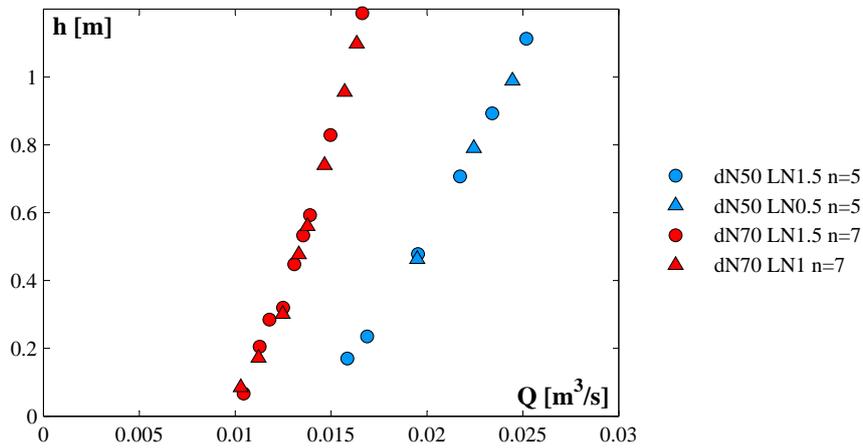


Figura 10.22: Scale di deflusso per le configurazioni 10, 32, 18 e 4: DN100.

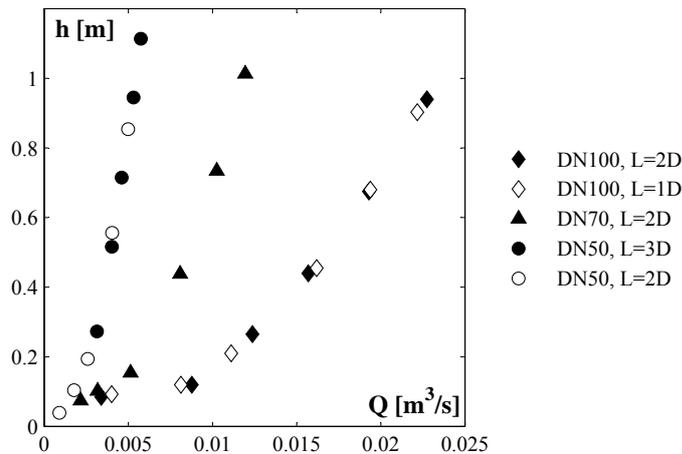


Figura 10.23: Scale di deflusso per le configurazioni 39, 66, 67, 62 e 69:  $d = 0$ .

ce efflusso a battente in parete sottile ospitato all'interno del pozzo e non interagente con esso.

È stato possibile ricreare tale condizione in presenza di un pozzo di lunghezza molto modesta. In particolare, per il DN100 il *Borda free flow* si è manifestato per  $L \leq 2D$ , per il DN70 per  $L \leq 2D$  e per il DN50 per  $L \leq 3D$ . Naturalmente, per lunghezze inferiori a quelle limite le scale di deflusso risultano invariate, non avendo la lunghezza più alcuna influenza sul deflusso, come testimoniato dalla Fig. 10.23.

In Fig. 10.24 è mostrata la conduzione delle prove per il pozzo DN100 e lunghezza pari a 0.2 m. Partendo da valori molto alti di portate e tiranti la condizione di deflusso che si è naturalmente stabilita è stata quella di *full flow*; tuttavia, arrivati ad un determinato valore di  $Q$  (quinto punto da destra) si è spontaneamente instaurato il *Borda free flow* con conseguente innalzamento del tirante. Per successive diminuzioni di tirante la scala di deflusso naturale è risultata quella di tipo Borda. È stato comunque possibile indurre artificialmente il *full flow* ocludendo il pozzo; il tirante è risultato diminuire fino a un minimo corrispondente alla scala di deflusso di *full flow*, per il quale si è ripristinato il *Borda free flow*. Tale operazione ha dunque consentito di ricostruire entrambe le scale per lo stesso valore di  $L$  (Fig. 10.24). Per la lunghezza  $L = 1D$  il range indagato di portate ha sempre manifestato condizioni di *Borda free flow*. Per quanto riguarda infine il DN50, per lo stesso valore  $L = 3D$ , investigato in due separate occasioni con due diversi tubi a simulare il pozzo, il comportamento è risultato una prima volta *full flow* e una seconda volta *Borda free flow*, a testimonianza dell'estrema instabilità di questa configurazione che risulta *borderline* tra i due comportamenti. Anche in questo caso si dispone dunque di entrambe le scale di deflusso per le due diverse condizioni (Fig. 10.25).

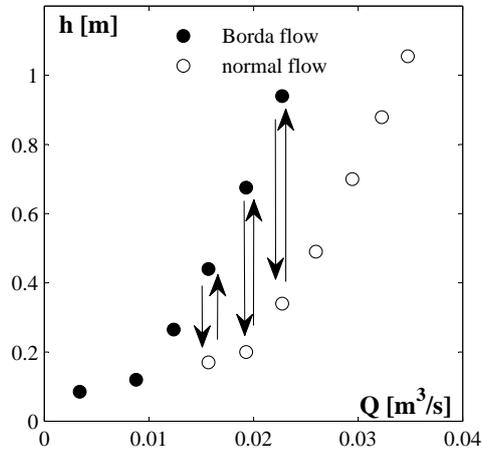


Figura 10.24: Scale di deflusso per la configurazione 39: DN100,  $L = 2D$ .

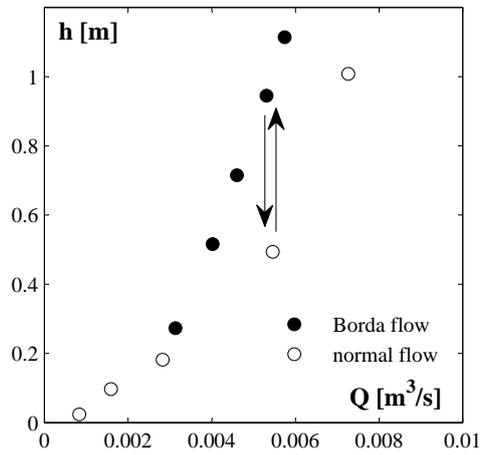


Figura 10.25: Scale di deflusso per la configurazione 62: DN50,  $L = 3D$ .

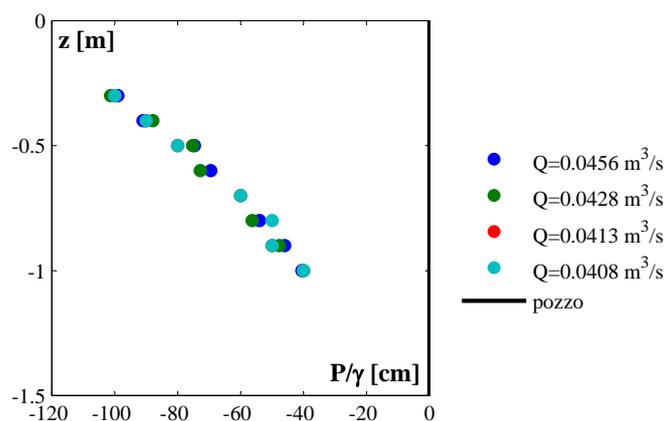


Figura 10.26: Andamento delle pressioni per le configurazioni 31, 28, 21, 20: DN100, LN1.5.

## 10.5 Pressioni

Coerentemente con quanto esposto nei precedenti paragrafi, anche le pressioni lungo il pozzo presentano caratteristiche diverse per le varie condizioni di deflusso. In particolare, quando il pozzo si presenta in regime di *weir flow* le pressioni (nel seguito si farà sempre riferimento a quelle relative) risultano pressoché nulle; in regime *full flow* esse presentano invece valori finiti e crescenti lungo l'asse del pozzo; in regime *transitional flow* si presenta una perfetta alternanza tra i due. Appare chiaro, dunque, che le pressioni che suscitano maggiore attenzione sono quelle che si hanno in regime di *full flow*; in presenza di aeroforo, inoltre, si farà riferimento agli affondamenti massimi, che, presentando numerose misure all'interno della regione di *full flow*, permettono di ricostruire con più precisione l'andamento delle pressioni.

### 10.5.1 Configurazioni prive di aeroforo

In assenza di aeroforo, in tutte le prove sperimentali caratterizzate da un regime di pressurizzazione le pressioni hanno manifestato valori negativi in prossimità dell'imbocco, certamente dovuti alla forte perdita di carico localizzata all'ingresso del manufatto. Partendo dunque da un valore negativo, tanto minore quanto minore è il tirante, la pressione aumenta in maniera pressoché lineare al diminuire della quota fino ad annullarsi in corrispondenza dello sbocco in atmosfera (Figg. 10.26, 10.27, 10.28, 10.29, 10.30 e 10.31).

Come si evince dal confronto tra le Figg. 10.26, 10.27 e 10.28, si nota che a parità di portata le depressioni che si sviluppano lungo il pozzo sono tanto maggiori quanto maggiori sono la lunghezza e il diametro del pozzo stesso; quest'ultima affermazione è comunque solo presumibile, giacché i

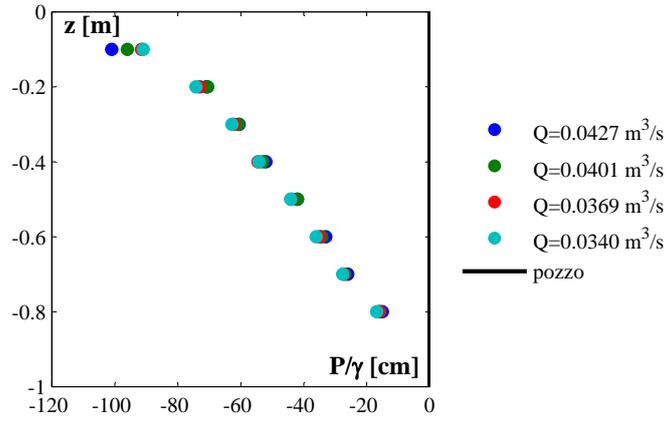


Figura 10.27: Andamento delle pressioni per le prove 378, 379, 380, 381: DN100, LN1.

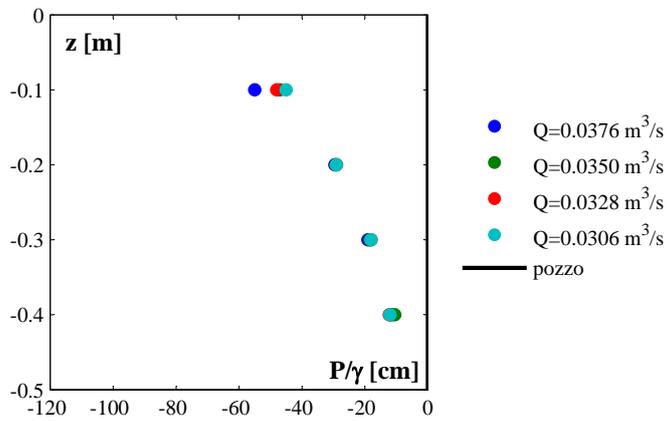


Figura 10.28: Andamento delle pressioni per le prove 477, 478, 479, 480: DN100, LN0.5.

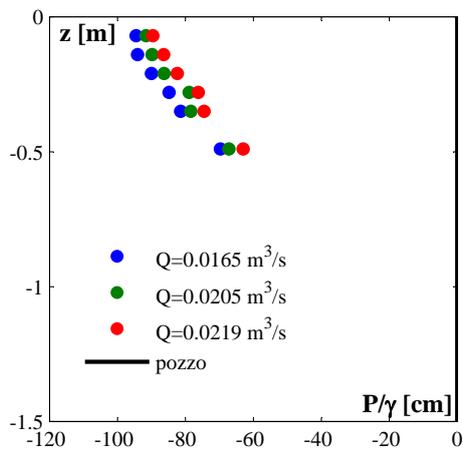


Figura 10.29: Andamento delle pressioni per le prove 508, 514, 506: DN70, LN1.5.

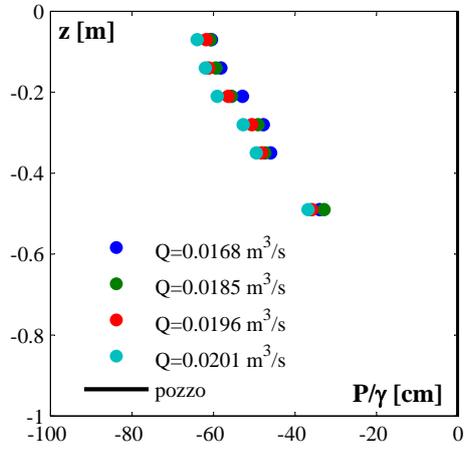


Figura 10.30: Andamento delle pressioni per le prove 560, 561, 562, 563: DN70, LN1.

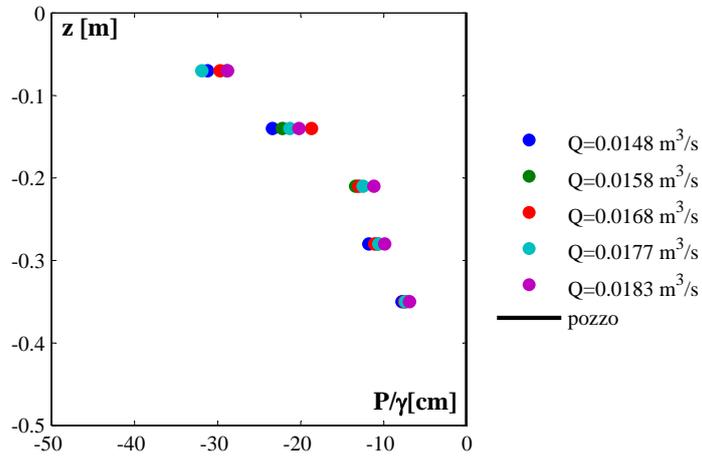


Figura 10.31: Andamento delle pressioni per le prove 612, 611, 610, 609, 608: DN70, LN0.5.

valori sperimentali di portata osservati in presenza del DN70 sono nettamente inferiori a quelli osservati con il DN100. Si può inoltre notare che, per le configurazioni per le quali si hanno a disposizione misure in prossimità dell'imbocco, le depressioni manifestano un valore nettamente diverso nella prima sezione di misura, per poi allinearsi intorno a una retta nelle sezioni successive. A parità di configurazione invece, le depressioni sono tanto maggiori quanto minore è la portata defluente, e quindi il carico sulla sezione di imbocco; tuttavia, la variabilità delle pressioni con la portata è comunque assai modesta.

### 10.5.2 Configurazioni dotate di aeroforo

In presenza di aeroforo si nota invece una particolarità introdotta con buona probabilità dal tripletto di viti che blocca l'estremità inferiore del tubo coassiale; si presenta infatti una perdita di carico localizzata di estremità che comporta un brusco innalzamento della pressione immediatamente a monte di essa, che si manifesta con un andamento curvilineo del diagramma delle pressioni (Figg. 10.32, 10.33, 10.34, 10.35, 10.36 e 10.37). Ancora più a monte, le pressioni diminuiscono in maniera pressoché lineare per chiudere con un valore minimo in corrispondenza dell'imbocco. Tale minimo è maggiore rispetto alle configurazioni prive di aeroforo, e tanto minore quanto minore è la portata a parità di configurazione, potendo risultare anche positivo per le portate più elevate; a parità di portata, invece, si sviluppano depressioni maggiori all'aumentare della sezione idrica, sia per variazioni dell'aeroforo che del pozzo. La lunghezza del pozzo non sembra invece avere una netta influenza sul regime di pressioni, poiché la quantità che maggiormente influisce sul fenomeno è l'estensione del *full flow*, che in presenza di aeroforo è pari all'affondamento. Al di sotto dell'aeroforo le pressioni manifestano valori leggermente diversi da zero e quasi sempre negativi, anche se apparentemente incorrelati con le pressioni lungo l'aeroforo; tali valori diventano comunque nulli nelle vicinanze dell'estremità inferiore del pozzo.

Le pressioni appena citate sono state tutte misurate a mezzo del quadro di piezometri ad U collegato alle prese disposte lungo il pozzo; i vicini vuotometri non consentono infatti, a causa del fondo scala piuttosto ampio, di misurare con la richiesta precisione valori modesti di depressione, e affatto i valori positivi. L'impiego dei vuotometri diventa però essenziale allorché si manifestano in vasca vortici completamente sviluppati; tali vortici nascono proprio per soddisfare il richiamo di aria generato dalla presenza di depressioni lungo il pozzo, ma poiché, data l'elevata velocità, l'aria stessa risulta in depressione, ne consegue un incremento generale delle depressioni lungo il pozzo, oltre che un intrappolamento caotico di aria all'interno del manufatto. L'innalzamento delle depressioni è dunque legato alla formazione di vortici completamente sviluppati, e come questi risulta verificarsi con una

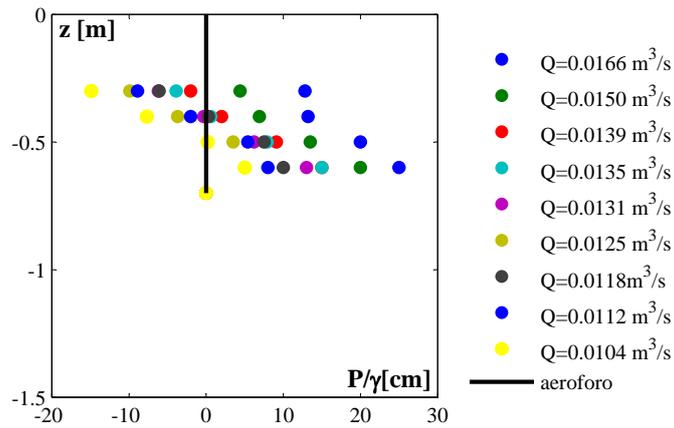


Figura 10.32: Andamento delle pressioni per le prove 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79: DN100, LN1.5, dN70,  $n = 7$ .

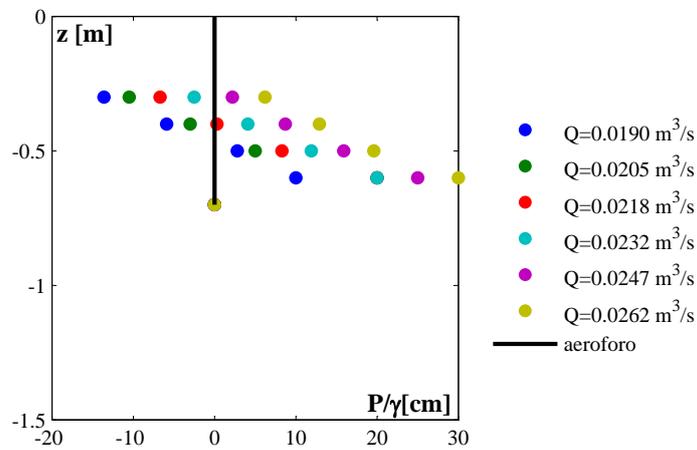


Figura 10.33: Andamento delle pressioni per le prove 155, 150, 151, 152, 153, 154: DN100, LN1.5, dN50,  $n = 7$ .

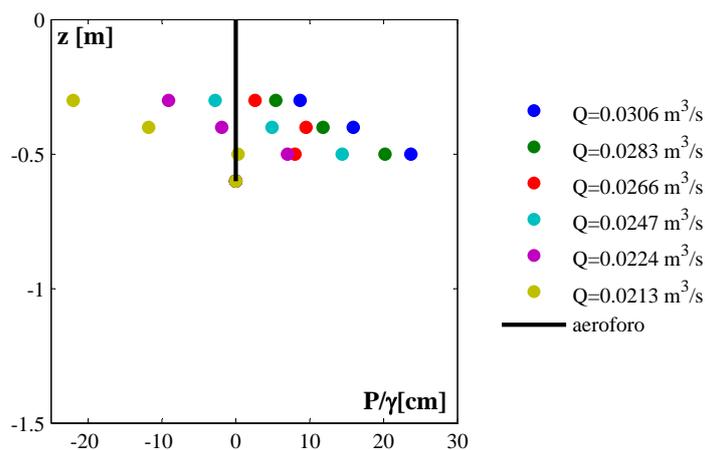


Figura 10.34: Andamento delle pressioni per le prove 200, 201, 202, 203, 204, 205: DN100, LN1.5, dN30,  $n = 6$ .

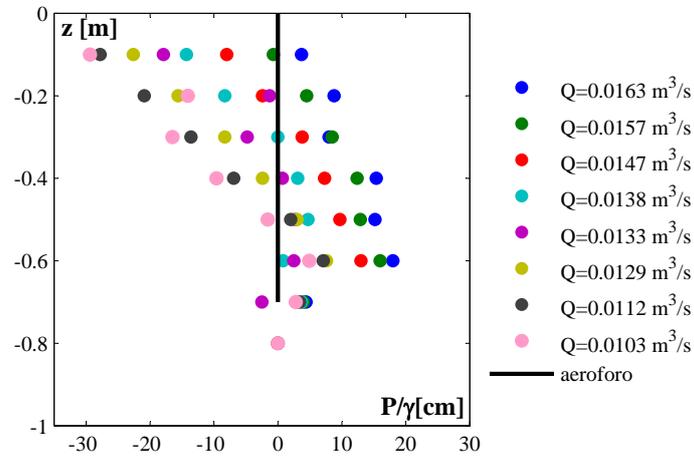


Figura 10.35: Andamento delle pressioni per le prove 250, 251, 252, 253, 249, 254, 255, 256: DN100, LN1, dN70,  $n = 7$ .

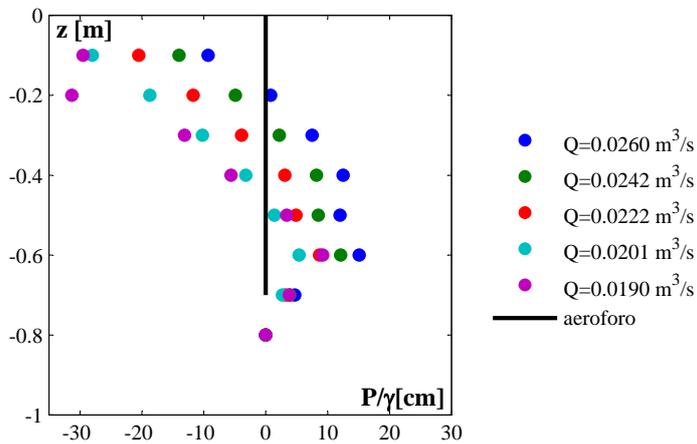


Figura 10.36: Andamento delle pressioni per le prove 297, 298, 299, 300, 307: DN100, LN1, dN50,  $n = 7$ .

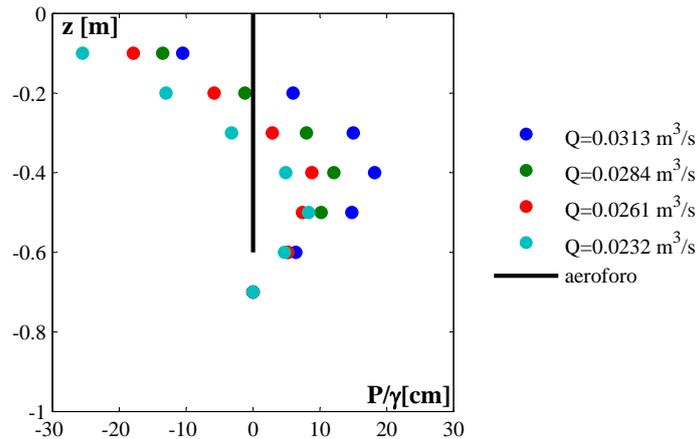


Figura 10.37: Andamento delle pressioni per le prove 342, 3443, 344, 345: DN100, LN1, dN30,  $n = 6$ .

certa frequenza durante ciascuna prova sperimentale, variabile certamente con parametri quali portata  $Q$ , lunghezza  $L$ , diametri  $D$  e  $d$ , affondamento  $n$ , ma anche affetta da una certa casualità. Con riferimento ad uno specifico intervallo di tempo osservato, infatti, non tutti i vortici presentano la stessa intensità in termini di depressione indotta, e perciò è possibile che, a parità di configurazione, si osservino vortici molto intensi ed altri estremamente lievi sia per portate alte che per portate basse (non oltre la sommergenza critica), anche se il loro numero sarà certamente inferiore quanto più piccola è la depressione all'imbocco del pozzo. Inoltre, l'imprevedibilità del fenomeno è favorita dall'impossibilità pratica di tener conto di una serie di parametri di difficilissima valutazione, quali la circuitazione.

Nonostante gli aspetti di casualità, appare comunque importante notare come le depressioni indotte dai vortici abbiano un'entità estremamente elevata e certamente non trascurabile anche per dimensioni dell'impianto alquanto modeste rispetto alle tipiche applicazioni pratiche (Fig. 10.38). Rapportati ad un sistema reale, si intuisce come tali valori possano facilmente attingere la cavitazione, con tutti i danni che ne conseguirebbero.

## 10.6 Misure dinamiche del tirante idrico

Come evidenziato nel capitolo dedicato alla descrizione dell'apparato sperimentale, quest'ultimo è corredato di un sistema di acquisizione video costituito da una fotocamera a 25 fps, il cui utilizzo si è reso necessario in svariate circostanze, ma soprattutto durante il regime di *transitional flow*; in questi casi infatti è risultato indispensabile monitorare il tirante idrico in vasca, fortemente variabile, per ricavare delle misure significative, ed in particolare il valore medio, minimo e massimo, per i quali nel presente ela-

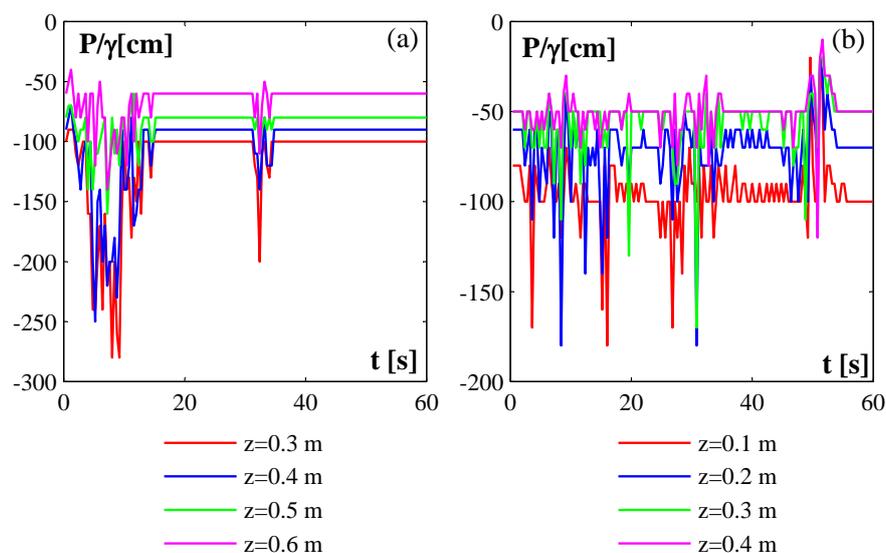


Figura 10.38: Registrazione delle pressioni ai vuotometri per una durata pari a 60 secondi, con riferimento alle prove 38 (a) (DN100, LN1.5) e 382 (b) (DN100, LN1);  $z$  è la distanza dalla sezione di imbocco del pozzo.

borato si tenterà una correlazione con le variabili del sistema. Inoltre, un certo interesse hanno destato le caratteristiche dell'oscillazione, che tuttavia non sono oggetto di studio della presente tesi. Appare comunque utile fornire qualche esempio, al fine di completare l'illustrazione dei regimi di deflusso; in Fig. 10.39 è dunque riportata l'oscillazione del tirante in vasca  $h$  con riferimento alla configurazione caratterizzata da DN100, dN50, LN1.5 (id 10) per quattro valori di portata risultati in regime *transitional*. Si noti la differente forma dell'onda al variare della portata, con la fase di risalita del tirante che risulta avere una durata tanto minore rispetto alla fase di discesa quanto maggiore è  $Q$ ; l'onda corrispondente al valore maggiore di portata presenta inoltre la minore ampiezza e il maggiore periodo.

## 10.7 Misura della portata d'aria

Come già evidenziato nel capitolo relativo, l'apparato sperimentale è corredato di un sistema di misura della velocità dell'aria in ingresso all'aeroforo, costituito nello specifico da un mulinello. Tuttavia, il limitato fondo scala dello strumento non ha consentito di estendere la campagna di misure a tutti i punti sperimentali, poichè molto spesso, soprattutto in presenza degli aerofori di diametro minore, la velocità è risultata eccessiva. Si riportano in Fig. 10.40 unicamente le misure che si riferiscono a configurazioni che è stato possibile caratterizzare con completezza, ed in particolare quelle caratterizzate da DN100, dN70 e LN1.5, con gradi di affondamento  $n$  variabili

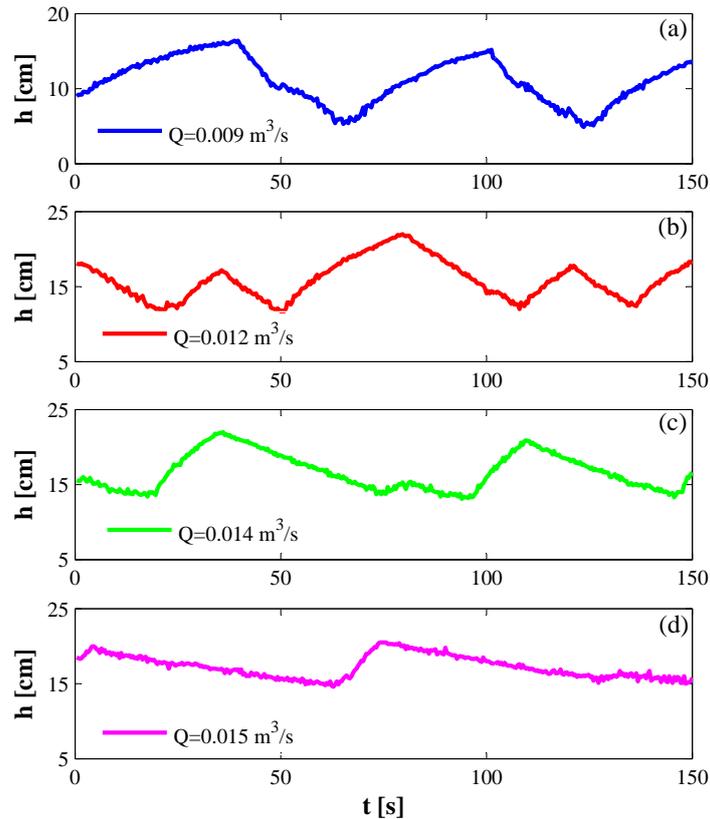


Figura 10.39: Variazione nel tempo del tirante idrico  $h$  per le prove 166 (a), 165 (b), 164 (c) e 163 (d): DN100, dN50, LN1.5.

da 0 a 7. Si nota in particolare che ai punti sperimentali in regime di *weir flow* e *transitional flow* corrispondono misure di  $Q_a$  pressoché indipendenti da  $n$ ; tali misure sono comunque affette da una notevole dispersione, soprattutto perché, con riferimento al *transitional flow*, esse sono mediate tra le fasi di discesa e di risalita dell'oscillazione, che tuttavia presentano regimi di pressione lungo il pozzo nettamente diversi. Per quanto concerne invece il *full flow*, il rapporto  $Q_a/Q$  è in sostanza indipendente da  $n$ , mentre, a parità di portata liquida, il valore di aria richiamato attraverso l'aeroforo è tanto maggiore quanto minore è il suo affondamento. Ciò è prevedibile in quanto, per  $n$  modesti, la quantità  $L - nD$  è maggiore e dunque richiede più aria per essere mantenuta a pressione atmosferica; viceversa, affondamenti alti comportano lunghezze  $L - nD$  minori e dunque la richiesta d'aria necessaria a garantire la pressione atmosferica lungo tutto il pozzo, al di sotto dell'estremità inferiore dell'aeroforo, è minore.

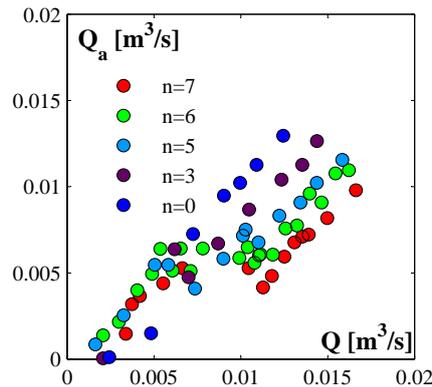


Figura 10.40: Misure della portata d'aria  $Q_a$  rispetto alla portata liquida  $Q$  per le configurazioni 4, 5, 6, 7, e 8: DN100, dN70, LN1.5.

## 10.8 Elementi di vorticità

Come anticipato nello stato dell'arte, un aspetto inatteso, che ha complicato non poco lo svolgimento delle prove sperimentali, è stato lo sviluppo di vortici nella vasca di carico. In particolare, si sono osservati due tipi di vortici, la cui definizione è utile per meglio comprendere la sperimentazione effettuata:

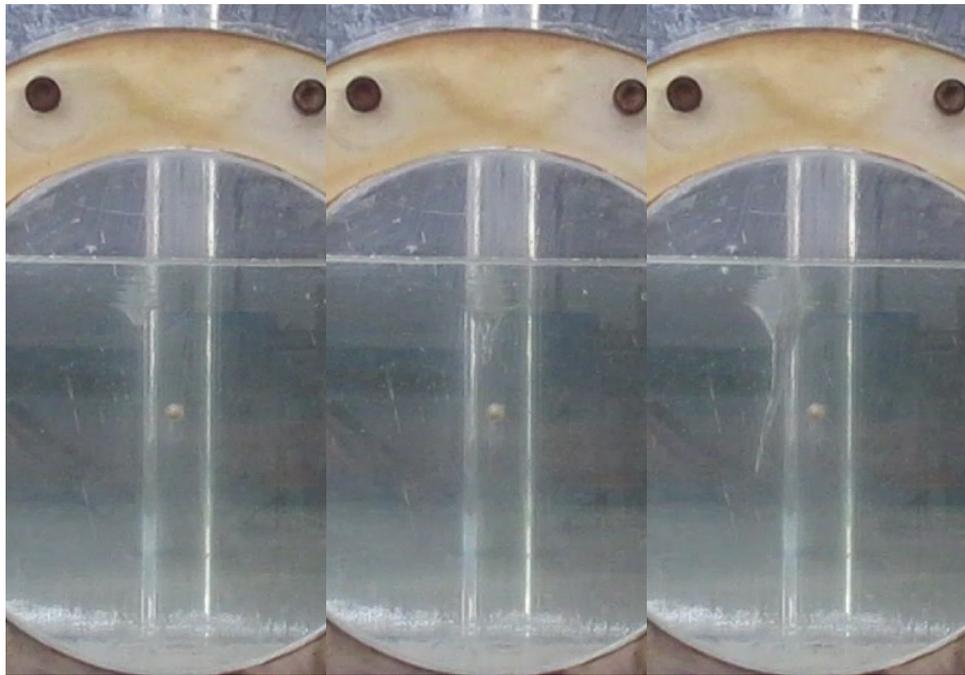
- Vortici a pressione atmosferica: si tratta di vortici ad ampio raggio, confrontabile con quello della luce, che apportano al pozzo aria in pressione atmosferica (Fig. 10.41). Dalle osservazioni risulta che tali vortici si sviluppano per valori molto bassi di portata e tirante, ed infatti sono risultati caratteristici della condizione di *weir flow*, durante la quale essi persistono per una durata circa pari a quella dell'intera prova; tale regime non è dunque direttamente assimilabile ad una condizione di efflusso a stramazzo, poiché il moto dei filetti fluidi in ingresso al pozzo è elicoidale, proprio in conseguenza della presenza di questo tipo di vortici.
- Vortici in depressione: si tratta di vortici completamente sviluppati, di diametro ridotto, che apportano al pozzo aria in depressione. La loro formazione (Fig. 10.42) causa un forte rumore, tanto maggiore quanto maggiore è lo sbalzo di pressione apprezzabile mediante i vuotometri installati lungo il pozzo. Tale tipo di vortice è stato osservato sia in condizione di *full flow*, dove rappresenta l'unico elemento di perturbazione in un deflusso altrimenti indisturbato (Fig. 10.43), sia in fase di *transitional flow*, dove la formazione di vortici è apparsa caratterizzare la fascia di tiranti in prossimità del passaggio tra la fase discendente e quella ascendente. Sembra anzi che il vortice determini appunto quell'apporto impulsivo di aria che consente il passaggio tra le due fasi.



Figura 10.41: Vortice a pressione atmosferica durante una prova sperimentale in *weir flow*.

Normalmente, lo studio dei vortici viene affrontato con riferimento ad un livello particolare di sviluppo oltre il quale si ritiene che il vortice non sia ammissibile. Di tutte le tipologie osservate, quello che ha mostrato conseguenze più pericolose è risultato essere il vortice completamente sviluppato in depressione; esso infatti, oltre ad incrementare in maniera impulsiva le depressioni lungo il pozzo, già di per sé di notevole entità, soprattutto in assenza di aeroforo, determina l'intrappolamento di sacche d'aria di dimensioni non trascurabili, che potrebbero comportare problemi ad opere idrauliche eventualmente presenti a valle del pozzo. Infine, la presenza di vortici in depressione particolarmente persistenti e di diametro non trascurabile rispetto alla luce, oltre ad avere effetto sul regime di pressione lungo il pozzo, può determinare l'insorgere di una sezione contratta in corrispondenza dell'imbocco, con un conseguente incremento di tirante (Fig. 10.44).

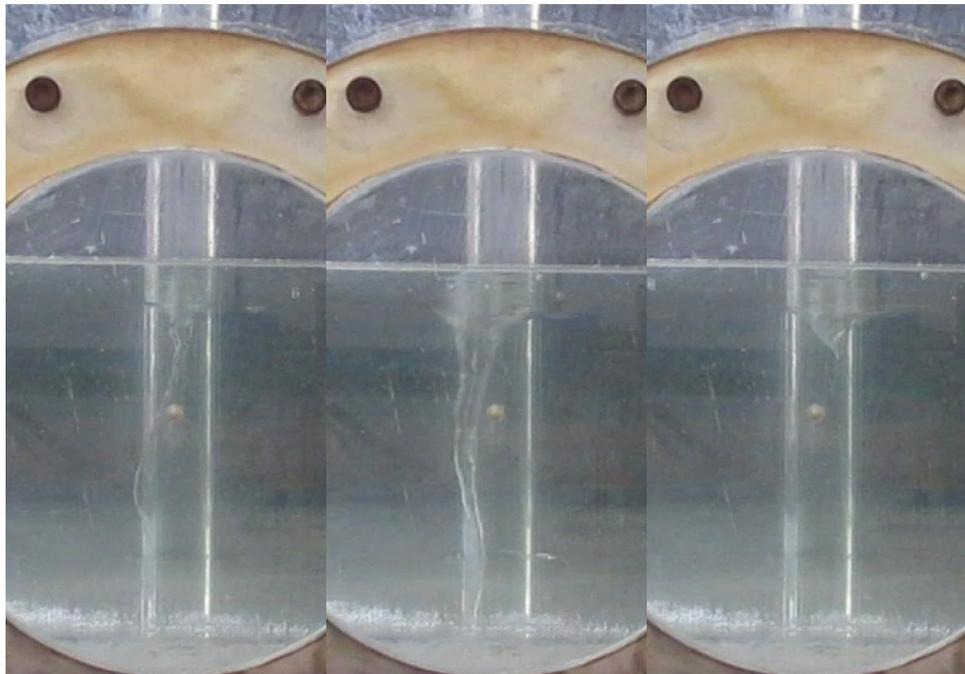
Per quanto riguarda la scala di deflusso, non si è osservata una precisa influenza dei vortici sul posizionamento dei punti sperimentali; anche nel caso di innesco di sezione contratta, e conseguente incremento dei tiranti in vasca, tale variazione è comunque trascurabile rispetto al carico.



(a)

(b)

(c)



(d)

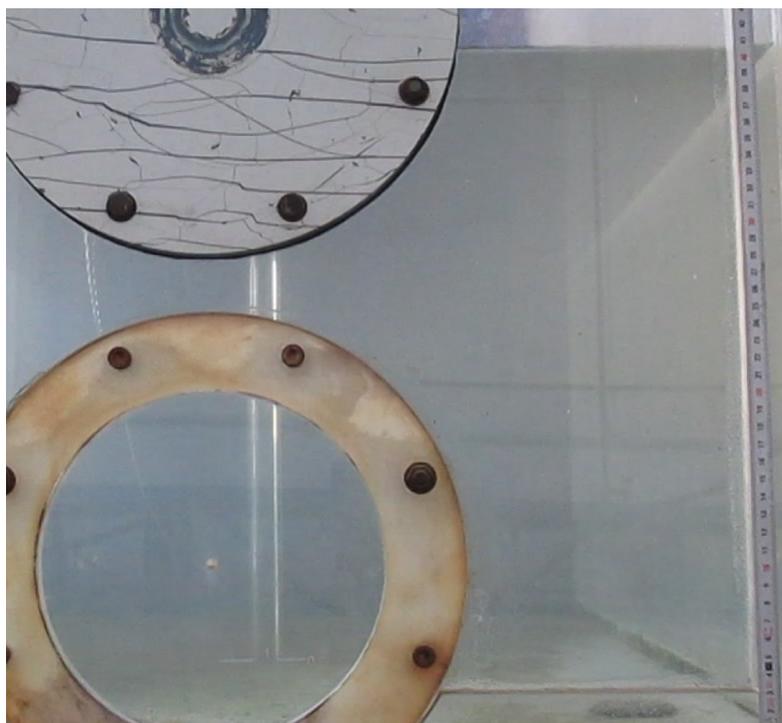
(e)

(f)

Figura 10.42: Stadi evolutivi di un vortice: *dimple* (a), stadi intermedi (b, c, d), *air core vortex* (e), *dimple* (f).



Figura 10.43: Intrappolamento di aria a seguito della formazione di un vortice in depressione in condizione di *full flow*.



(a)



(b)

Figura 10.44: Influenza dei vortici sul tirante: tirante indisturbato  $h = 40.5$  cm (a) e innalzamento ad  $h = 41.5$  cm conseguente alla formazione della sezione contratta, visibile come luminescenza in prossimità dell'imbocco (b).

## Elaborazione dei dati

Fra gli errori ci sono quelli che puzzano di fogna, e quelli che odorano di bucato.

---

Cesare Pavese

Nel presente capitolo verrà effettuata una elaborazione analitica dei dati presentati nel capitolo precedente; in particolare, verrà prestata maggiore attenzione al regime di *full flow*, per il quale i risultati sperimentali sono stabili e fisicamente basati, mentre per il *non full flow*, vista l'estrema instabilità di comportamento e dispersione dei dati, verranno semplicemente fornite delle indicazioni di massima, comunque utili in fase di progettazione.

L'analisi del regime di *full flow* viene affrontata separatamente per le seguenti categorie di dati:

- configurazioni prive di aeroforo;
- configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$ ;
- configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ .

e successivamente unificata. È infatti opportuno trattare separatamente quegli insiemi di dati che presentano una diversa geometria di imbocco, nello specifico la presenza o meno del tubo coassiale; l'ulteriore distinzione relativa al grado di affondamento discende invece dalla necessità di considerare come terzo tipo di imbocco quello caratterizzato da un cambio di sezione (da corona circolare a sezione circolare semplice) molto vicino alla luce.

### 11.1 Analisi dimensionale

Al fine di effettuare un'analisi esplorativa delle variabili che influenzano il fenomeno, si consideri che il processo di deflusso attraverso il manufatto

oggetto di studio è funzione di una serie di parametri, tra cui la geometria dell'imbocco (espressa da un parametro di forma  $\psi$ ), il carico sulla luce  $h$ , la lunghezza del *full flow*  $L_{full}$ , il diametro equivalente  $D_{eq}$ , l'accelerazione di gravità  $g$ , la portata  $Q$ :

$$\mathcal{F}_1(\psi, h, L_{full}, D_{eq}, g, Q) = 0 \quad (11.1)$$

Applicando il teorema di Buckingham, lo stesso processo può essere espresso da una funzione di una stringa di numeri adimensionali ricavabili dai parametri dell'Eq. (11.1). Essendo il processo di tipo puramente cinematico, si possono scegliere due variabili di riferimento, nello specifico  $g$  e  $L_{full}$ , per operare l'adimensionalizzazione; risulta quindi:

$$\mathcal{F}_2\left(\psi, \frac{h}{L_{full}}, \frac{D_{eq}}{L_{full}}, \frac{Q}{\sqrt{gL_{full}^5}}\right) = 0 \quad (11.2)$$

da cui si ottiene l'equazione che regola il processo:

$$\frac{Q}{\sqrt{gL_{full}^5}} = \mathcal{F}_3\left(\psi, \frac{D_{eq}}{L_{full}}, \frac{h}{L_{full}}\right) \quad (11.3)$$

che, riscritta in altra forma, diventa:

$$\frac{Q}{\sqrt{gL_{full}^5}} = a(\psi) \cdot \left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^b \cdot \left(\frac{h}{L_{full}}\right)^c \quad (11.4)$$

L'evidenza sperimentale mostra una dipendenza della portata adimensionale dal parametro adimensionale  $h/L_{full} + 1$ ; pertanto conviene considerare come equazione base la seguente relazione:

$$\frac{Q}{\sqrt{gL_{full}^5}} = a(\psi) \cdot \left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^b \cdot \left(\frac{h}{L_{full}} + 1\right)^c \quad (11.5)$$

Il valore dei parametri  $a$ ,  $b$  e  $c$  può essere valutato mediante un'operazione di taratura sui dati sperimentali; tale operazione viene eseguita ricercando, per ognuno dei tre insiemi di configurazioni del pozzo (senza aeroforo, con aeroforo con  $n \geq 3$  e con aeroforo con  $n < 3$ ) quei valori di  $a$ ,  $b$  e  $c$  che minimizzano la sommatoria degli scarti quadratici, scelta come funzione obiettivo:

$$SSE = \sum_{i=1}^N \left( \frac{Q_{oss,i}}{\sqrt{gL_{full}^5}} - \frac{Q_{calc,i}}{\sqrt{gL_{full}^5}} \right)^2 \quad (11.6)$$

dove  $Q_{oss,i}$  è la portata "osservata" per l' $i$ -simo punto sperimentale, e  $Q_{calc,i}$  è la corrispondente portata "calcolata" mediante l'Eq. (11.5);  $N$  è invece il numero di punti sperimentali appartenenti a ciascun insieme.

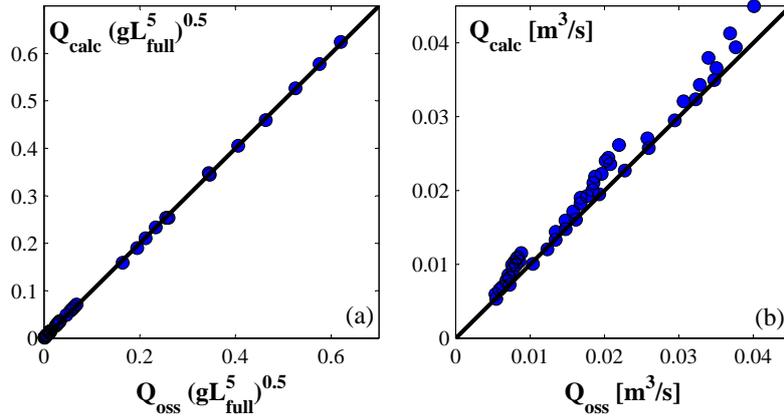


Figura 11.1: Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. eq11.5 adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni prive di aeroforo.

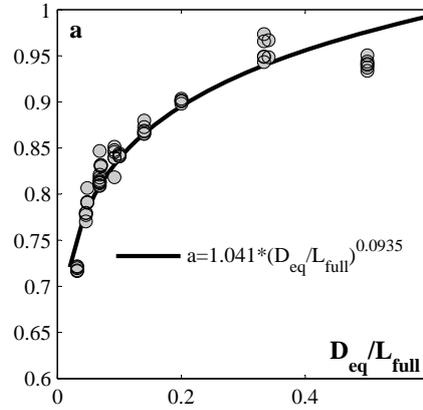


Figura 11.2: Dipendenza di  $a$  dal parametro  $D_{eq}/L_{full}$  per le configurazioni prive di aeroforo ( $R^2 = 92\%$ ).

### 11.1.1 Configurazioni prive di aeroforo

Con riferimento a questo insieme di dati, la taratura dei parametri  $a$ ,  $b$  e  $c$  fornisce  $a = 0.94$ ,  $b = 1.95$  e  $c = 0.51$ . Il confronto tra la portata adimensionale osservata sperimentalmente e quella calcolata mediante l'Eq. (11.5) presenta un ottimo allineamento intorno alla bisettrice del primo e terzo quadrante, come mostrato in Fig. 11.1(a). Se tuttavia si confrontano le portate in  $[m^3/s]$ , si nota che l'allineamento non è altrettanto buono, come mostra la Fig. 11.1(b): ciò è indice della presenza di una ulteriore dipendenza che non è stata evidentemente colta. Per meglio identificare tale ulteriore dipendenza, si è calcolata la funzione  $a(\psi)$ , che evidentemente deve essere espressa

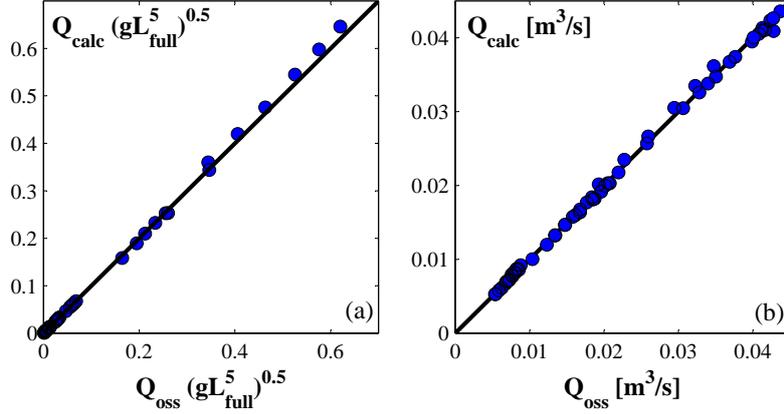


Figura 11.3: Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.9) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni prive di aeroforo.

come  $a(\psi, D_{eq}/L_{full})$ , attraverso la seguente:

$$a\left(\psi, \frac{D_{eq}}{L_{full}}\right) = \frac{\frac{Q_{oss}}{\sqrt{gL_{full}^5}}}{\left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^b \cdot \left(\frac{h}{L_{full}} + 1\right)^c} \quad (11.7)$$

e la si è quindi confrontata con la variabile  $D_{eq}/L_{full}$ ; la Fig. 11.2 mostra che esiste una forte dipendenza attraverso l'espressione

$$a\left(\psi, \frac{D_{eq}}{L_{full}}\right) = 1.041 \cdot \left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^{0.0935} \quad (11.8)$$

con un coefficiente di determinazione  $R^2$  pari al 92%. L'equazione che descrive il fenomeno di deflusso per le configurazioni prive di aeroforo è dunque la seguente:

$$\frac{Q}{\sqrt{gL_{full}^5}} = \left[1.041 \cdot \left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^{0.0935}\right] \cdot \left(\frac{D_{eq}}{L_{full}}\right)^{1.95} \cdot \left(\frac{h}{L_{full}} + 1\right)^{0.51} \quad (11.9)$$

Utilizzando l'Eq. (11.9) il confronto tra la portata osservata e quella calcolata è ottimo sia in termini adimensionali che dimensionali (Fig. 11.3).

### 11.1.2 Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$

Per tali configurazioni, la taratura dei parametri dell'Eq. (11.5) fornisce  $a = 0.95$ ,  $b = 2.07$  e  $c = 0.49$ . Il confronto tra le portate osservate sperimentalmente e quelle calcolate mostra un ottimo accordo sia in termini

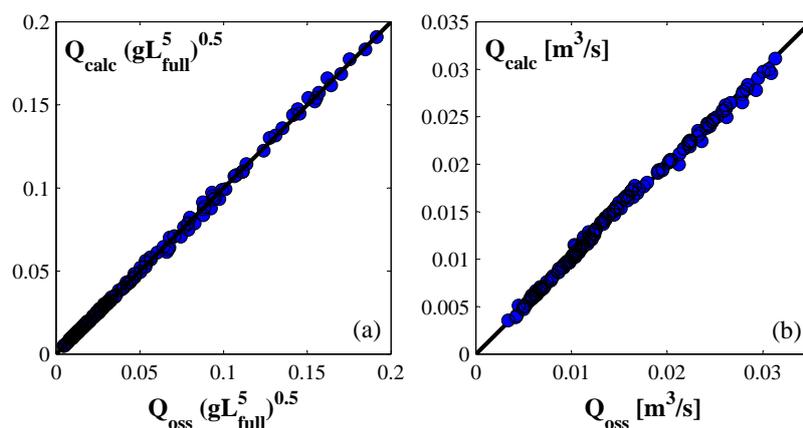


Figura 11.4: Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.5) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$

dimensionali che adimensionali, come mostrato in Fig 11.4. Non c'è dunque, in questo caso, la necessità di controllare dipendenze aggiuntive dei residui da ulteriori variabili.

### 11.1.3 Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$

Per tali configurazioni, l'operazione di taratura fornisce  $a = 0.90$ ,  $b = 2.00$  e  $c = 0.49$ ; il confronto tra i valori osservati e quelli calcolati è soddisfacente per le portate adimensionali ma meno per quelle dimensionali, come mostrato in Fig. 11.5. L'analisi dei residui mostra che sussiste una ulteriore dipendenza, tralasciata dalla regressione precedente, dal raggio idraulico  $R$  (Fig. 11.6); è dunque opportuno considerare per  $a$  la seguente espressione:

$$a = 9.6 \cdot R + 076 \quad (11.10)$$

dove  $R$  è il raggio idraulico, ed  $R^2 = 69\%$ . Il confronto tra la portata osservata e quella calcolata è a questo punto ottimo sia con riferimento alle portate adimensionali che a quelle dimensionali, come illustrato in Fig. 11.7.

## 11.2 Approccio energetico

Si consideri lo schema funzionale dell'impianto, mostrato in Fig. 9.12: dato un punto A appartenente alla superficie libera e un punto B appartenente alla sezione terminale del *full flow*, essendo il moto gradualmente variato è possibile applicare il teorema di Bernoulli ad una traiettoria passante per A

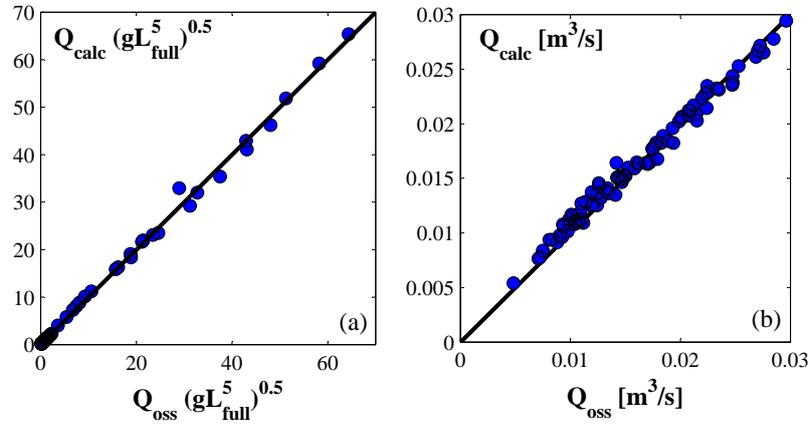


Figura 11.5: Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.5) con  $a = 0.90$  adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ .

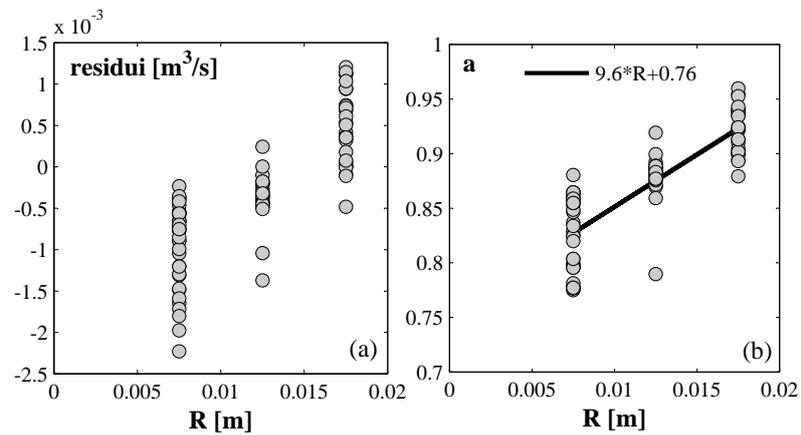


Figura 11.6: Dipendenza dal raggio idraulico  $R$  dei residui dimensionali (a) e del parametro  $a$  (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ .

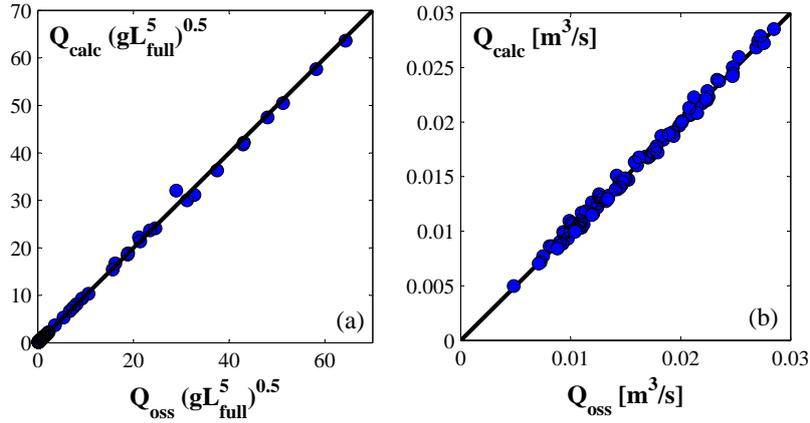


Figura 11.7: Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante le Eqq. (11.5) e (11.10) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ .

e B:

$$z_A + \frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} = z_B + \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + jL_{full} + \sum_{i=1}^n \xi_i \frac{V^2}{2g} \quad (11.11)$$

dove  $z$  è la quota del punto considerato a partire da un piano di riferimento orizzontale arbitrario;  $P/\gamma$  è l'altezza piezometrica (con  $\gamma$  peso specifico del fluido);  $V^2/2g$  è l'altezza cinetica (con  $V$  velocità e  $g$  accelerazione di gravità);  $j$  rappresenta le perdite di carico distribuite;  $L_{full}$  è la lunghezza di estensione del *full flow*;  $\xi$  tiene conto delle perdite di carico localizzate in  $n$  singolarità (in questo caso l'unica singolarità è rappresentata dall'imbocco del pozzo).

Poichè A appartiene alla superficie libera si ha  $P_A = 0$  ed è legittimo trascurare la velocità  $V_A$  rispetto a  $V_B$  se A è sufficientemente lontano dall'imbocco del pozzo (si porrà dunque  $V_B = V$ ); il perimetro della sezione terminale è a contatto con l'atmosfera, pertanto essendo la sezione orizzontale e il moto gradualmente variato si può porre  $P_B = 0$ . Scegliendo come piano di riferimento la sezione terminale del pozzo, infine, si ha  $z_A - z_B = h + L_{full}$  dove  $h$  è il tirante in vasca. L'Eq. (11.11) diventa dunque:

$$h + L_{full} = jL_{full} + (1 + \xi) \frac{V^2}{2g} \quad (11.12)$$

Utilizzando la legge di Darcy-Weisbach in funzione del raggio idraulico  $R = (D - d)/4$  si ha:

$$j = \frac{f}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (11.13)$$

dove  $f$  è il fattore di attrito; analizzando l'entità delle pressioni lungo il pozzo risulta applicabile la teoria dei tubi lisci, pertanto  $f$  può essere calcolato

mediante la legge di Blasius:

$$f = 0.316 \cdot Re^{-0.25} \quad (11.14)$$

essendi  $Re$  il numero di Reynolds della corrente:

$$Re = \frac{4RV}{\nu} \quad (11.15)$$

Sostituendo l'Eq. (11.13) nell'Eq. (11.12), e ricordando che  $V = Q/\sigma$ , si ottiene:

$$h + L_{full} = (1 + f \frac{L_{full}}{4R} + \xi) \frac{Q^2}{2g\sigma^2} \quad (11.16)$$

Appare più corretto, tuttavia, ammettere che la perdita di carico localizzata si manifesti entro una certa distanza dalla sezione di imbocco, oltre la quale si esplicano invece le perdite distribuite; tale distanza è posta pari a  $8R$ , cosicché l'Eq. (11.16) diventa:

$$h + L_{full} = (1 + f \frac{L_{full} - 8R}{4R} + \xi) \frac{Q^2}{2g\sigma^2} \quad (11.17)$$

Introducendo il termine sintetico  $\beta$ , pari a:

$$\beta = f \frac{L_{full} - 8R}{4R} \quad (11.18)$$

l'Eq. (11.17) diventa:

$$h + L_{full} = (1 + \beta + \xi) \frac{Q^2}{2g\sigma^2} \quad (11.19)$$

Riaggiustando i termini dell'Eq. (11.19) si ottiene:

$$Q = \sigma \sqrt{\frac{1}{1 + \beta + \xi}} \sqrt{2g(h + L_{full})} \quad (11.20)$$

o analogamente:

$$Q = C_d \cdot \sigma \sqrt{2g(h + L_{full})} \quad (11.21)$$

dove  $C_d$  è il *discharge coefficient* o coefficiente di portata, pari a:

$$C_d = \sqrt{\frac{1}{1 + \beta + \xi}} \quad (11.22)$$

che dunque dipende dalla geometria dell'imbocco, dalla lunghezza del pozzo e dal numero di Reynolds della portata defluente.

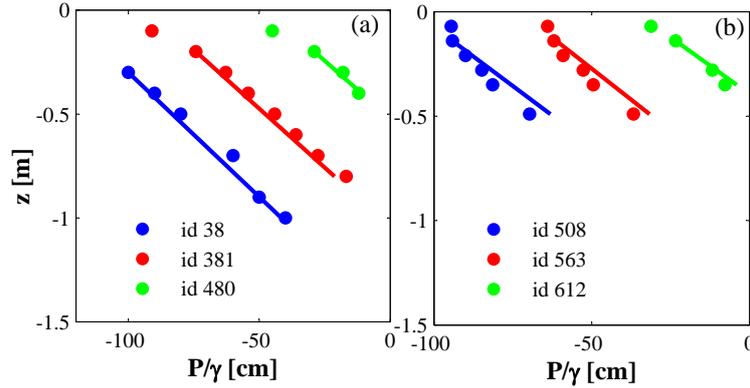


Figura 11.8: Confronto tra le misure di pressione e la teoria dei tubi lisci per il DN100 (a) e il DN70 (b).

L'Eq. (11.21) rappresenta la scala di deflusso del manufatto in condizioni di *full flow*, valida sia in presenza che in assenza di aeroforo; scelta una legge di resistenza per esprimere le perdite di carico distribuite (nel nostro caso la presenza di pareti in Plexiglas rende possibile l'uso della teoria dei tubi idraulicamente lisci), il legame tra il tirante  $h$  sulla sezione di imbocco e la portata  $Q$  defluente nel pozzo è completamente conosciuto a meno della perdita di carico localizzata  $\xi$ . In Fig. 11.8 è mostrato il confronto tra i punti sperimentali rappresentativi delle pressioni e il risultato dell'applicazione della teoria dei tubi lisci, e in particolare delle Eqq. (11.13) e (11.14); l'andamento teorico delle pressioni rappresenta molto bene le misure per il D100, mentre comporta una lieve sovrastima per il D70.

Si procede nel seguito alla calibrazione della perdita di carico concentrata  $\xi$  sulla base dei dati sperimentali, eseguita separatamente per le tre diverse geometrie di imbocco, corrispondenti all'assenza di aeroforo, alla presenza di aeroforo con  $n \geq 3$  e all'aeroforo con  $n < 3$ . La taratura viene eseguita ricercando, per ogni configurazione del pozzo (intesa come combinazione dei parametri  $D$ ,  $d$ ,  $L_{full}$ ,  $n$ ) quel valore di  $\xi$  che minimizza la sommatoria degli scarti quadratici, scelta come funzione obiettivo:

$$SSE = \sum_{i=1}^N (Q_{oss,i} - Q_{calc,i})^2 \quad (11.23)$$

dove  $Q_{oss,i}$  è la portata "osservata" per l' $i$ -simo punto sperimentale, e  $Q_{calc,i}$  è la corrispondente portata "calcolata" mediante l'Eq. (11.21);  $N$  è invece il numero di punti sperimentali che caratterizzano ciascuna configurazione.

### 11.2.1 Configurazioni prive di aeroforo

In Tab 11.1 sono riportate le 12 configurazioni prive di aeroforo, per ognuna delle quali è stato calcolato il valore della perdita di carico localizzata  $\xi$

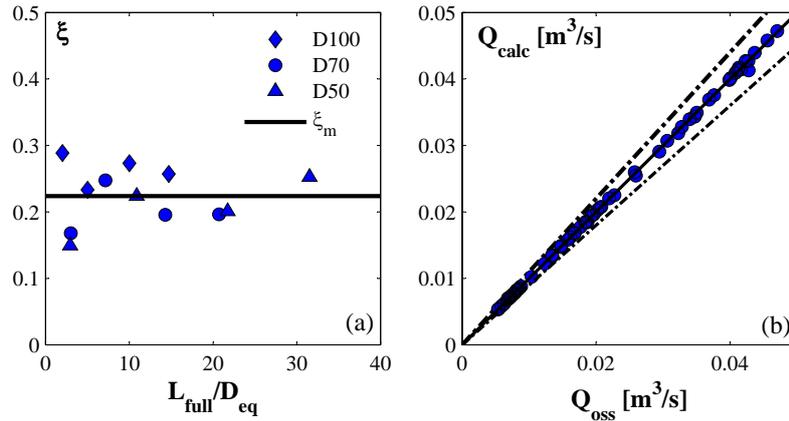


Figura 11.9: Perdita di carico localizzata  $\xi$  per le configurazioni prive di aeroforo in funzione del rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  (a); confronto tra la portata osservata e quella calcolata imponendo  $\xi_m = 0.2238$  (b). In evidenza le fasce di errore al 10%.

che minimizza la funzione obiettivo  $SSE$ ; la Fig. 11.9(a) mostra che  $\xi$  non dipende nè dal diametro nè dalla lunghezza del pozzo, risultando praticamente costante con il rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ . Per tutti i diametri e le lunghezze sperimentali si può quindi considerare  $\xi_m = 0.2238$ .

Tabella 11.1: Configurazioni con  $d = 0$ .

id	DN [mm]	$\sigma$ [m <sup>2</sup> ]	$R$ [m]	$L_{full}$ [m]	$\xi$
1	100	0.007854	0.025	1.5	0.2570
30	100	0.007854	0.025	1	0.2732
38	100	0.007854	0.025	0.5	0.2332
39	100	0.007854	0.025	0.2	0.2886
40	70	0.003848	0.018	1.5	0.1964
47	70	0.003848	0.018	1	0.1956
53	70	0.003848	0.018	0.5	0.2476
58	70	0.003848	0.018	0.21	0.1679
59	50	0.001662	0.012	1.5	0.2525
60	50	0.001662	0.012	1	0.2008
61	50	0.001662	0.012	0.5	0.2238
62	50	0.001662	0.012	0.135	0.1493

La Fig. 11.9(b) mostra il confronto tra la portata  $Q_{oss}$  osservata e quella  $Q_{calc}$  calcolata mediante il modello che tiene conto della perdita di carico localizzata con  $\xi_m = 0.2238$ ; si nota l'ottimo accordo tra le due variabili con scarti percentuali inferiori al 10%.

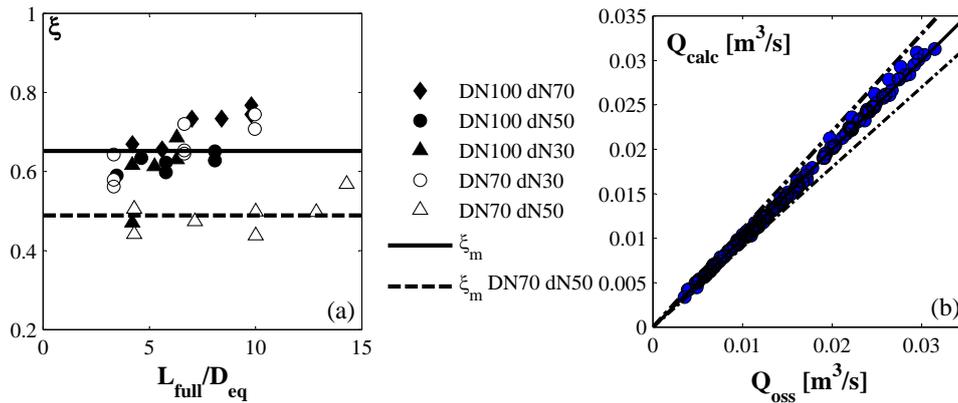


Figura 11.10: Perdita di carico localizzata  $\xi$  per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$  in funzione del rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  (a) e confronto tra la portata osservata e quella calcolata, con in evidenza le fasce di errore al 10% (b).

### 11.2.2 Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$

La Tab. 11.2 mostra le 32 configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$ , per ognuna delle quali è stata calcolata la perdita di carico localizzata  $\xi$ . Tali valori sono stati rappresentati, come per le configurazioni prive di aeroforo, in funzione del rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  per valutare un'eventuale dipendenza tra i parametri; la Fig. 11.10(a) mette in evidenza due raggruppamenti, uno costituito dalla maggioranza dei punti sperimentali, per i quali si nota una debole proporzionalità diretta con la lunghezza adimensionale, e l'altro costituito dai punti relativi alle sole configurazioni caratterizzate da DN70 e dN50 per le quali  $\xi$  sembra essere costante con  $L_{full}/D_{eq}$ . Tale differenza è imputabile ad effetti di scala non previsti per le configurazioni 41, 42, 43, 48, 49, 54 e 55, dovuti alla sezione idrica estremamente ridotta (la minima tra quelle oggetto della sperimentazione).

La dipendenza funzionale mostrata per il primo raggruppamento in Fig. 11.10(a) non è tuttavia supportata da giustificazioni fisiche; in effetti, la perdita di carico localizzata è dovuta esclusivamente alle caratteristiche geometriche dell'imbocco, che determinano una particolare curvatura dei filetti fluidi, la cui deviazione da una traiettoria lineare comporta appunto una perdita energetica. Si ritiene perciò che il numero relativamente esiguo di punti sperimentali non sia sufficiente a dimostrare una dipendenza lineare; si considererà dunque  $\xi_m = 0.6521$ , mentre per i punti "anomali" si ha  $\xi_m = 0.4889$ .

In Fig. 11.10(b) è mostrato il confronto tra la portata osservata e quella calcolata facendo riferimento a  $\xi_m$ ; si può notare che l'accordo è molto buono, con gli scarti percentuali ampiamente contenuti entro il  $\pm 10\%$ .

Tabella 11.2: Configurazioni con  $n \geq 3$ .

id	DN [mm]	dN [mm]	$D_{eq}$ [m]	$R$	LN [m]	$n$ [m]	$L_{full}$ [m]	$\xi$
4	100	70	0.0714	0.0075	1.5	7	0.7	0.7677
5	100	70	0.0714	0.0075	1.5	6	0.6	0.7340
6	100	70	0.0714	0.0075	1.5	5	0.5	0.7337
7	100	70	0.0714	0.0075	1.5	3	0.3	0.6693
9	100	50	0.0866	0.0125	1.5	7	0.7	0.6281
10	100	50	0.0866	0.0125	1.5	5	0.5	0.6229
11	100	50	0.0866	0.0125	1.5	3	0.3	0.5901
14	100	30	0.0954	0.0175	1.5	6	0.6	0.6307
15	100	30	0.0954	0.0175	1.5	4	0.4	0.4704
18	100	70	0.0714	0.0075	1	7	0.7	0.7445
19	100	70	0.0714	0.0075	1	4	0.4	0.6557
22	100	50	0.0866	0.0125	1	7	0.7	0.6512
23	100	50	0.0866	0.0125	1	4	0.4	0.6342
26	100	30	0.0954	0.0175	1	6	0.6	0.6858
27	100	30	0.0954	0.0175	1	4	0.4	0.6163
32	100	50	0.0866	0.0125	0.5	5	0.5	0.5980
35	100	30	0.0954	0.0175	0.5	5	0.5	0.6131
41	70	50	0.0490	0.005	1.5	10	0.7	0.5681
42	70	50	0.0490	0.005	1.5	7	0.49	0.4984
43	70	50	0.0490	0.005	1.5	3	0.21	0.5056
44	70	30	0.0632	0.01	1.5	3	0.21	0.6432
45	70	30	0.0632	0.01	1.5	6	0.42	0.7205
46	70	30	0.0632	0.01	1.5	9	0.63	0.7445
48	70	50	0.0490	0.005	1	9	0.63	0.4969
49	70	50	0.0490	0.005	1	5	0.35	0.4739
50	70	30	0.0632	0.01	1	9	0.63	0.7078
51	70	30	0.0632	0.01	1	6	0.42	0.6535
52	70	30	0.0632	0.01	1	3	0.21	0.5792
54	70	50	0.0490	0.005	0.5	7	0.49	0.4381
55	70	50	0.0490	0.005	0.5	3	0.21	0.4414
56	70	30	0.0632	0.01	0.5	6	0.42	0.6453
57	70	30	0.0632	0.01	0.5	3	0.21	0.5621

### 11.2.3 Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$

In Tab. 11.3 sono mostrate le 18 configurazioni caratterizzate da  $n < 3$ , con i relativi valori del parametro  $\xi$ ; in Fig. 11.11 è invece mostrato l'andamento della perdita di carico localizzata con la lunghezza adimensionale. Si nota in particolare che il parametro  $\xi$  risulta essere dipendente solo dal diametro equivalente e non dalla lunghezza: si hanno infatti tre valori medi di  $\xi$  per le tre combinazioni  $D-d$  ( $\xi_m = 0.4800$  per DN100 dN30,  $\xi_m = 0.6351$  per DN100 dN50 e  $\xi_m = 0.8254$  per DN100 dN70). Tra le configurazioni DN100 dN50, quella caratterizzata da  $L = 1.5$  m e  $n = 0$  (id 13) risulta essere un *outlier*, e viene come tale esclusa dalla valutazione del valore medio di  $\xi$ .

Tabella 11.3: Configurazioni con  $n < 3$ .

id	DN [mm]	dN [mm]	$D_{eq}$ [m]	$R$	LN [m]	$n$ [m]	$L_{full}$ [m]	$\xi$
2	100	70	0.071	0.008	1.5	1	0.100	0.9304
3	100	70	0.071	0.008	1.5	2	0.200	1.008
8	100	70	0.071	0.008	1.5	0	0.045	0.9128
12	100	50	0.087	0.013	1.5	1	0.100	0.6358
13	100	50	0.087	0.013	1.5	0	0.033	1.3347
16	100	30	0.095	0.018	1.5	2	0.200	0.4457
17	100	30	0.095	0.018	1.5	0	0.048	0.3934
20	100	70	0.071	0.008	1	2	0.200	0.6371
21	100	70	0.071	0.008	1	0	0.045	0.8266
24	100	50	0.087	0.013	1	2	0.200	0.6357
25	100	50	0.087	0.013	1	0	0.026	0.6961
28	100	30	0.095	0.018	1	2	0.200	0.5093
29	100	30	0.095	0.018	1	0	0.032	0.4763
31	100	70	0.071	0.008	0.5	2	0.200	0.6372
33	100	50	0.087	0.013	0.5	2	0.200	0.6075
34	100	50	0.087	0.013	0.5	0	0.039	0.6855
36	100	30	0.095	0.018	0.5	2	0.210	0.5684
37	100	30	0.095	0.018	0.5	0	0.040	0.6040

Più nello specifico, la Fig. 11.12(a) mostra il legame tra  $\xi_m$  e  $R$ , esprimibile come segue:

$$\xi_m = -32.6R + 1.07 \quad (11.24)$$

che mette in evidenza come la perdita localizzata descresca in maniera pressoché lineare all'aumentare del raggio idraulico, ovvero della sezione d'imbocco. Infine, in Fig. 11.12(b) è mostrato il confronto tra la portata osservata e la portata calcolata considerando l'Eq. (11.24); si nota un ottimo accordo, anche se con una dispersione lievemente maggiore rispetto alle configurazioni con  $d = 0$  o  $n \geq 3$ .

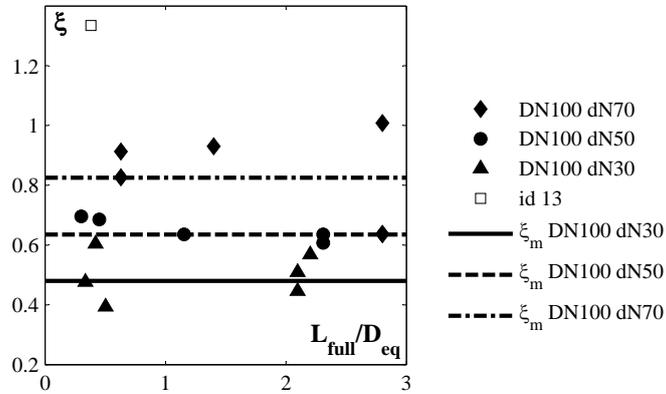


Figura 11.11: Perdita di carico localizzata  $\xi$  per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$  in funzione del rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ .

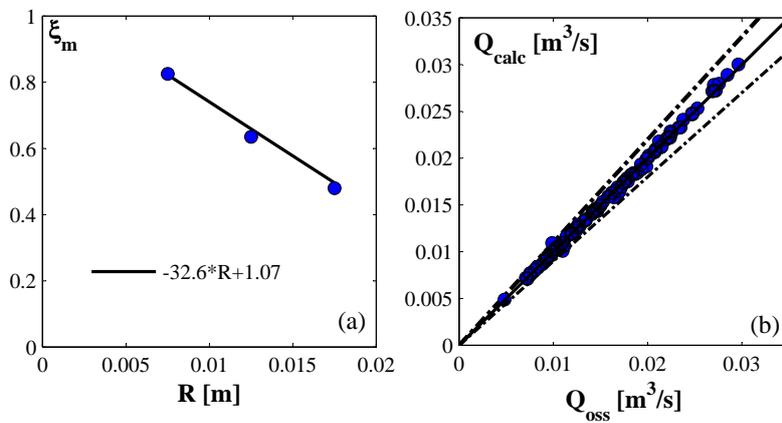


Figura 11.12: Perdita di carico localizzata media  $\xi_m$  per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$  in funzione del raggio idraulico  $R$ , con  $R^2 = 99.9\%$  (a) e confronto tra la portata osservata e quella calcolata mediante l'Eq. (11.24) (b). In evidenza le fasce di errore al 10%.

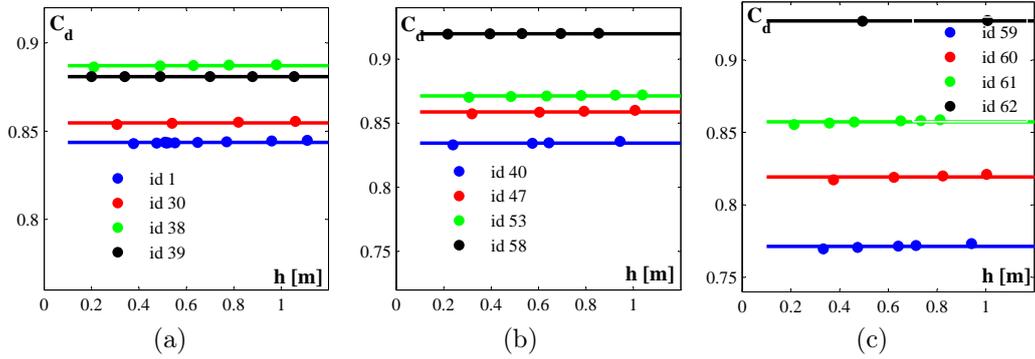


Figura 11.13: Andamento del coefficiente di portata  $C_d$  rispetto al tirante in vasca  $h$  per le configurazioni DN100 (a), DN70 (b) e DN50 (c).

### 11.3 Coefficiente di portata

Come visto nei paragrafi precedenti, la portata defluente attraverso un pozzo verticale è funzione della sezione idrica e del carico sulla sezione terminale, a mezzo di un coefficiente di proporzionalità  $C_d$  (coefficiente di portata) che tiene conto delle perdite di carico sia continue che localizzate, rispettivamente  $\beta$  e  $\xi$ :

$$\xi = \xi(D_{eq}, L_{full}), \quad \beta = \beta(h, D_{eq}, L_{full}) \implies C_d = C_d(h, D_{eq}, L_{full}) \quad (11.25)$$

A parità di configurazione geometrica, dunque,  $C_d$  assume un valore diverso per ogni prova sperimentale, ovvero per ogni valore di portata inviato al sistema; tuttavia, come mostrano le Figg. 11.13(a), (b) e (c), che si riferiscono alle configurazioni prive di aeroforo, la dipendenza di  $C_d$  da  $Q$ , ovvero da  $h$ , è sostanzialmente trascurabile, per cui è possibile, con una lievissima approssimazione, considerarne per ogni configurazione un valore medio  $C_{d,m}$ .

#### 11.3.1 Configurazioni prive di aeroforo

Prendendo in esame le configurazioni prive di aeroforo, le Figg. 11.14(a) e 11.14(b) mostrano che  $C_{d,m}$  dipende sia dalla lunghezza  $L_{full}$  che dal diametro  $D_{eq}$ , e più sinteticamente dal rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ , come mostrato in Fig. 11.15. Risulta in particolare:

$$C_{d,m} = -0.0044 \frac{L_{full}}{D_{eq}} + 0.9132 \quad (11.26)$$

con  $R^2 = 88\%$ .

I valori di  $C_{d,m}$  per le configurazioni senza aeroforo sono riportati in Tab. 11.4.

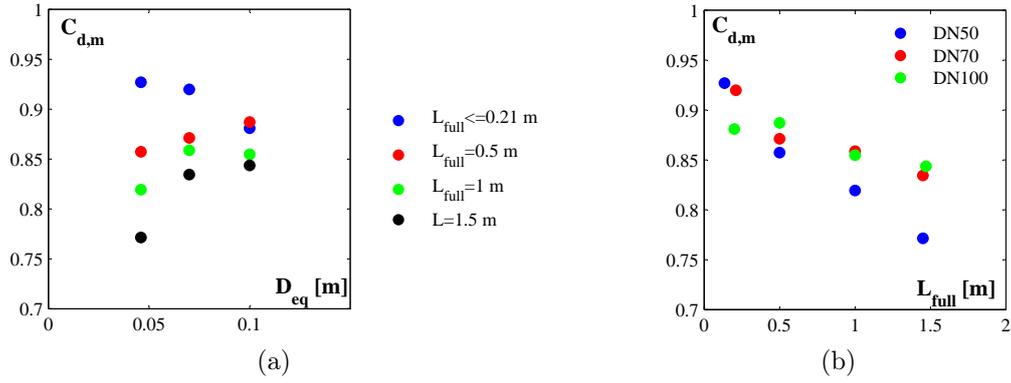


Figura 11.14: Dipendenza del coefficiente di portata medio  $C_{d,m}$  dal diametro del pozzo  $D_{eq}$  (a) e dalla lunghezza  $L_{full}$  (b).

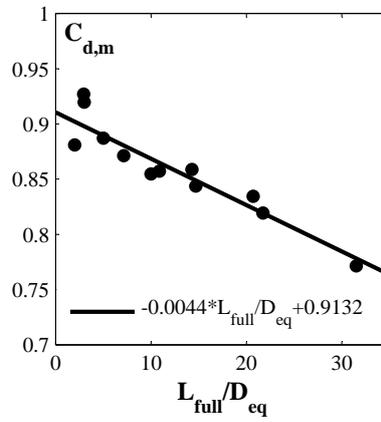


Figura 11.15: Dipendenza del coefficiente di portata  $C_d$  dal rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  ( $R^2 = 88\%$ ).

Tabella 11.4: Valori di  $C_{d,m}$  per le configurazioni  $d = 0$ .

id	DN [mm]	$L_{full}$ [m]	$L_{full}/D_{eq}$	$C_{d,m}$
1	100	1.47	14.7	0.844
30	100	1	10	0.855
38	100	0.5	5	0.887
39	100	0.2	2	0.881
40	70	1.45	20.7	0.834
47	70	1	14.3	0.859
53	70	0.5	7.1	0.871
58	70	0.21	3	0.920
59	50	1.45	31.5	0.771
60	50	1	21.7	0.819
61	50	0.5	10.9	0.857
62	50	0.135	2.9	0.927

### 11.3.2 Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$

Si considerino ora le configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$ , per le quali l'approccio analitico forniva una perdita localizzata  $\xi$  indipendente sia da  $L_{full}$  che da  $D_{eq}$ . Anche in questo caso, come mostrato in Fig. 11.16, il coefficiente di portata  $C_d$  si dimostra costante con il tirante  $h$  a parità di configurazione geometrica, per cui è possibile considerare un valore medio  $C_{d,m}$  (Tab. 11.5). La Fig. 11.17 mostra invece  $C_{d,m}$  in funzione del rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ : tale legame risulta essere di tipo lineare con  $R^2 = 76\%$ , e non si evincono ulteriori dipendenze dalla sezione; la forma funzionale è la seguente:

$$C_{d,m} = -0.01 \cdot \frac{L_{full}}{D_{eq}} + 0.81. \quad (11.27)$$

Le configurazioni caratterizzate da DN70 e dN50, che risultavano avere nel piano  $\xi, L_{full}/D_{eq}$  un andamento anomalo rispetto alle altre, sono incluse nei dati plottati in Fig. 11.17, dove non si evidenzia alcuna anomalia.

### 11.3.3 Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$

Per quanto concerne infine le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ , per le quali la perdita di carico localizzata  $\xi$  presentava una dipendenza lineare dal raggio idraulico  $R$ , il coefficiente di portata  $C_d$  si conferma indipendente dal tirante  $h$ , come mostra la Fig. 11.18. Considerato un valore medio  $C_{d,m}$  per ogni configurazione, esso risulta essere indipendente dalla lunghezza  $L_{full}$ , mentre è presente una dipendenza pressoché lineare da  $R$ , come mostrato in Fig. 11.19, secondo la seguente funzione:

$$C_{d,m} = 7.5 \cdot R + 0.68 \quad (11.28)$$

con  $R^2 = 99\%$ . Si noti la differenza tra  $C_{d,m}$ , mediato sul tirante ma diverso per ogni configurazione, e  $C_{d,R}$ , che rappresenta il valore medio dei coefficienti medi di portata per le diverse configurazioni caratterizzate dallo stesso valore di  $R$  (in questo caso dunque  $C_{d,m}$  è ulteriormente mediato su  $L_{full}$ ). I valori di  $C_{d,m}$  per le configurazioni in esame sono mostrati in Tab. 11.19; si noti che non è riportata la configurazione 13, che si è già dimostrata un *outlier*.

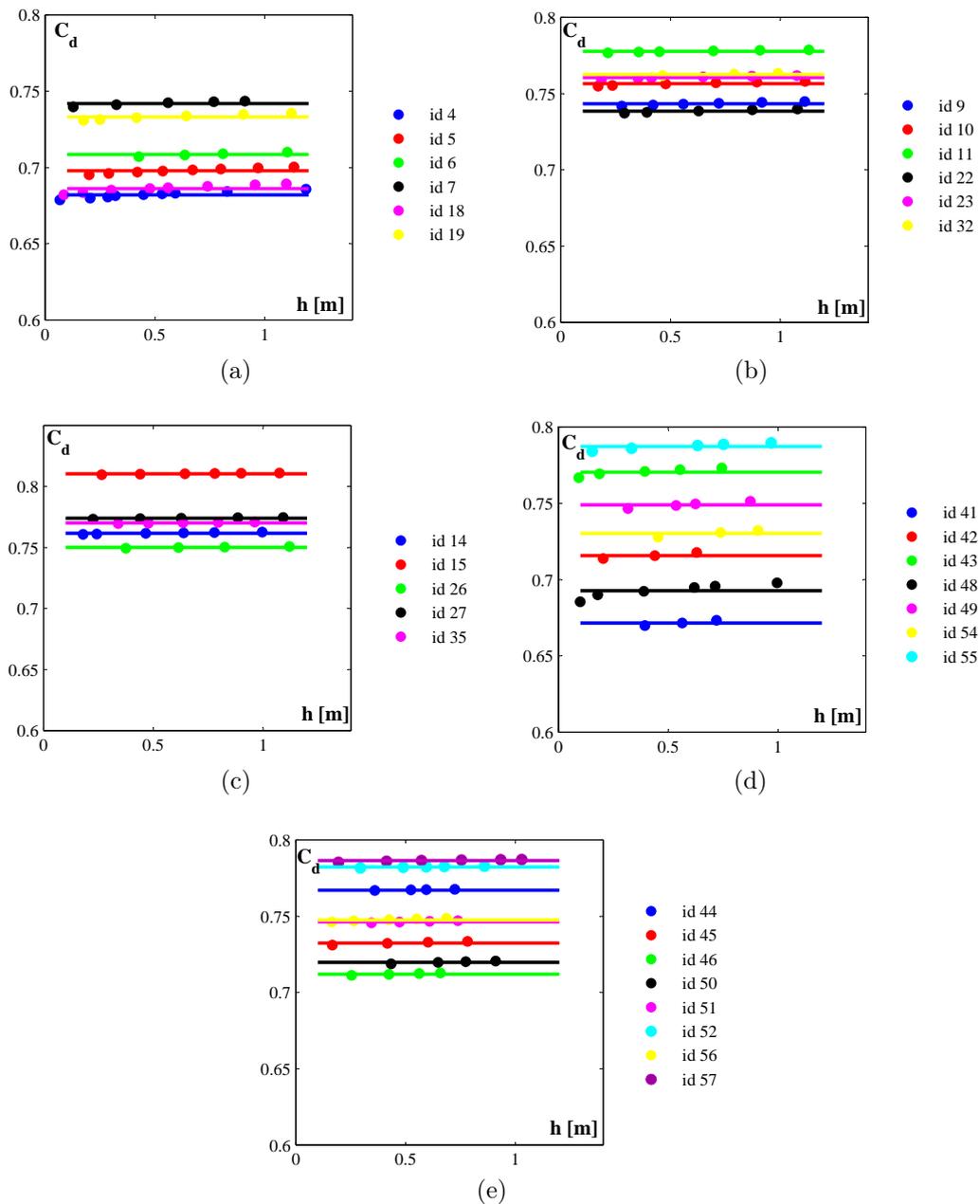


Figura 11.16: Andamento del coefficiente di portata  $C_d$  rispetto al tirante in vasca  $h$  per le configurazioni DN100 dN70 (a), DN100 dN50 (b), DN100 dN30 (c), DN70 dN50 (d) e DN70 dN30 (e) con  $n \geq 3$ .

Tabella 11.5: Valori di  $C_{d,m}$  per le configurazioni  $n \geq 3$ .

id	DN [mm]	dN [mm]	$D_{eq}[m]$	$L_{full}[m]$	$L_{full}/D_{eq}$	$C_{d,m}$
4	100	70	0.0714	0.700	9.8	0.682
5	100	70	0.0714	0.600	8.4	0.698
6	100	70	0.0714	0.500	7.0	0.709
7	100	70	0.0714	0.300	4.2	0.742
9	100	50	0.0866	0.700	8.1	0.743
10	100	50	0.0866	0.500	5.8	0.757
11	100	50	0.0866	0.300	3.5	0.778
14	100	30	0.0954	0.600	6.3	0.762
15	100	30	0.0954	0.400	4.2	0.810
18	100	70	0.0714	0.700	9.8	0.686
19	100	70	0.0714	0.400	5.6	0.733
22	100	50	0.0866	0.700	8.1	0.739
23	100	50	0.0866	0.400	4.6	0.761
26	100	30	0.0954	0.600	6.3	0.750
27	100	30	0.0954	0.400	4.2	0.774
32	100	50	0.0866	0.500	5.8	0.763
35	100	30	0.0954	0.500	5.2	0.770
41	70	50	0.0490	0.700	14.3	0.672
42	70	50	0.0490	0.490	10.0	0.716
43	70	50	0.0490	0.210	4.3	0.770
44	70	30	0.0632	0.210	3.3	0.767
45	70	30	0.0632	0.420	6.6	0.732
46	70	30	0.0632	0.630	10.0	0.712
48	70	50	0.0490	0.630	12.9	0.693
49	70	50	0.0490	0.350	7.1	0.749
50	70	30	0.0632	0.630	10.0	0.720
51	70	30	0.0632	0.420	6.6	0.746
52	70	30	0.0632	0.210	3.3	0.782
54	70	50	0.0490	0.490	10.0	0.730
55	70	50	0.0490	0.210	4.3	0.787
56	70	30	0.0632	0.420	6.6	0.747
57	70	30	0.0632	0.210	3.3	0.786

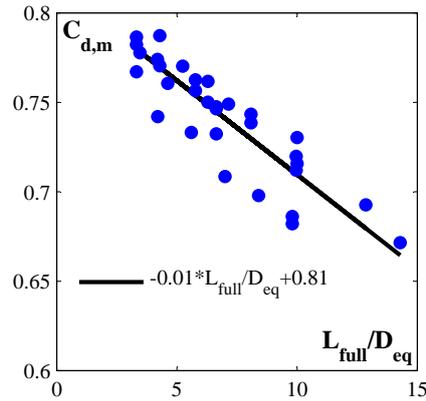


Figura 11.17: Andamento del coefficiente medio di portata  $C_{d,m}$  con il rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$  ( $R^2 = 76\%$ ).

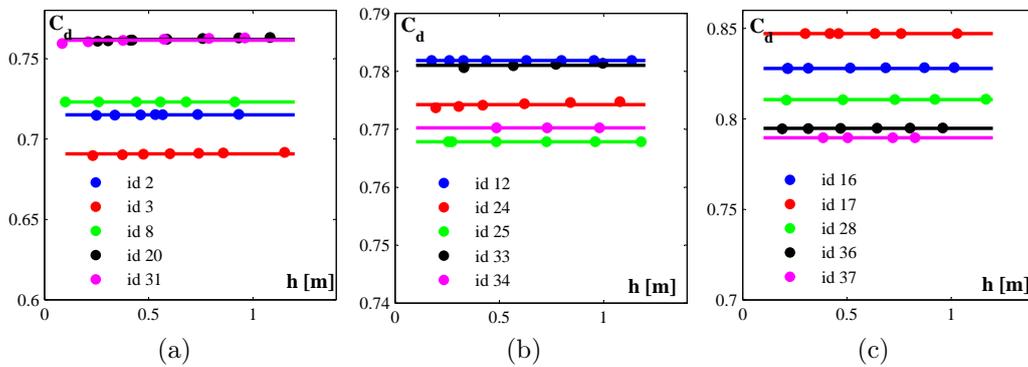


Figura 11.18: Andamento del coefficiente di portata  $C_d$  rispetto al tirante in vasca  $h$  per le configurazioni DN100 dN70 (a), DN100 dN50 (b) e DN100 dN30 con  $n < 3$ .

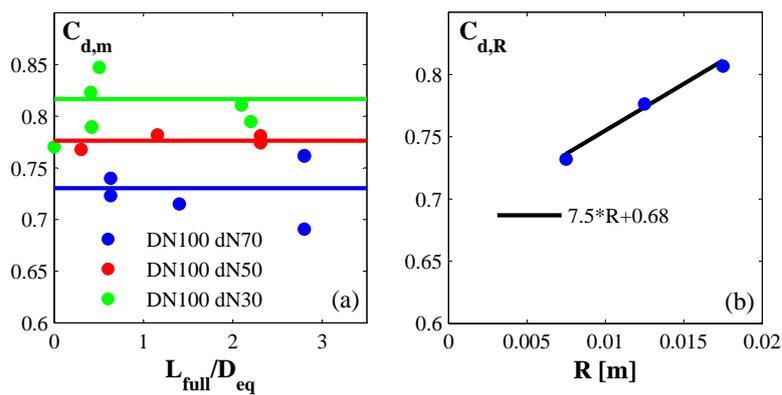


Figura 11.19: Andamento del coefficiente medio di portata  $C_{d,m}$  con il rapporto  $L_{full}/D_{eq}$  (a) e dipendenza del coefficiente  $C_{d,R}$  mediato sulla lunghezza dal raggio idraulico  $R$  (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$  ( $R^2 = 99\%$ ).

Tabella 11.6: Valori di  $C_{d,m}$  per le configurazioni  $n < 3$ .

id	DN [mm]	dN [mm]	$D_{eq}$ [m]	$L_{full}$ [m]	$L_{full}/D_{eq}$	$C_{d,m}$
2	100	70	0.0714	0.1	1.4	0.715
3	100	70	0.0714	0.2	2.8	0.691
8	100	70	0.0714	0.045	0.6	0.723
20	100	70	0.0714	0.2	2.8	0.762
21	100	70	0.0714	0.045	0.6	0.740
31	100	70	0.0714	0.2	2.8	0.761
12	100	50	0.0866	0.1	1.1	0.782
24	100	50	0.0866	0.2	2.3	0.774
25	100	50	0.0866	0.026	0.3	0.768
33	100	50	0.0866	0.2	2.3	0.781
16	100	30	0.0954	0.2	2.1	0.828
17	100	30	0.0954	0.048	0.5	0.847
28	100	30	0.0954	0.2	2.1	0.811
29	100	30	0.0954	0.039	0.41	0.823
34	100	30	0.0866	0.039	0.45	0.770
36	100	30	0.0954	0.21	2.20	0.795
37	100	30	0.0954	0.04	0.42	0.790

## 11.4 Unificazione dei risultati

Dai risultati dell'analisi dimensionale si evince che l'esponente  $c$  della variabile adimensionale  $h/L_{full} + 1$  è sempre circa pari a 0.5, mentre quello  $b$  della variabile  $D_{eq}/L_{full}$  è sempre circa pari a 2. Si può dunque concludere che la portata  $Q$  è esprimibile mediante la seguente funzione:

$$Q = a \cdot D_{eq}^2 \cdot \sqrt{h + L_{full}} \quad (11.29)$$

ed è dunque, analogamente a un deflusso in pressione, proporzionale alla radice quadrata del carico  $h + L_{full}$  sulla sezione terminale del pozzo e al quadrato del diametro  $D_{eq}$ , ovvero alla sezione idrica;  $a$  è in generale una funzione della forma  $\psi$  dell'imbocco, del diametro equivalente  $D_{eq}$  e della lunghezza  $L_{full}$ .

L'Eq. (11.29) è in effetti del tutto coincidente con l'Eq. (11.21) purché si ponga:

$$a = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{2} \cdot C_d \quad (11.30)$$

Nel paragrafo relativo i valori di  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono stati calibrati separatamente per le configurazioni prive di aeroforo, per quelle dotate di aeroforo con  $n \geq 3$  e quelle con  $n < 3$ ; i valori di  $a$  naturalmente variano, anche se solo lievemente, qualora si ponga arbitrariamente  $b = 2$  e  $c = 0.5$ . Tale operazione consente di confrontare i valori così ricalcolati di  $a$  con quelli di  $C_d$  al fine di verificare la validità dell'Eq. (11.30).

### 11.4.1 Configurazioni prive di aeroforo

Per quanto concerne le configurazioni prive di aeroforo, l'analisi dimensionale, fissando i valori di  $b$  e  $c$ , fornisce dei valori di  $a$ , mostrati in Fig. 11.20(a), che risultano fortemente dipendenti dal rapporto  $D_{eq}/L_{full}$ ; la Fig. 11.20(b) mostra invece la dipendenza tra i coefficienti medi di portata  $C_{d,m}$  e il rapporto  $D_{eq}/L_{full}$  (si noti che il legame tra  $C_{d,m}$  e  $L_{full}/D_{eq}$  è stato mostrato in Fig. 11.15). Le due funzioni risultano praticamente coincidenti, essendo  $0.96 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi/4 = 1.06$ .

### 11.4.2 Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$

Per le configurazioni dotate di aeroforo con  $n \geq 3$ , fissando il valore degli esponenti  $b$  e  $c$ , l'analisi dimensionale fornisce dei valori di  $a$  che risultano dipendenti dal rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ , come mostrato in Fig. 11.21(a); per quanto concerne il coefficiente di portata, risulta variare anch'esso con  $L_{full}/D_{eq}$ , come illustrato in Fig. 11.21(b). I due andamenti sono in realtà coincidenti, essendo  $0.9 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi/4 = 1$ .

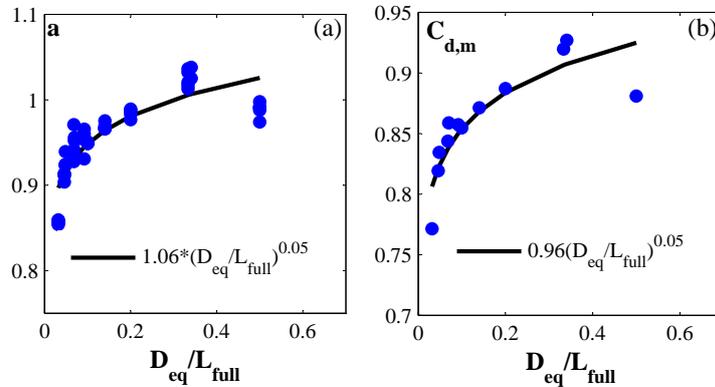


Figura 11.20: Andamento del parametro  $a$  (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti  $C_{d,m}$  (b) in funzione del rapporto  $D_{eq}/L_{full}$ ; i coefficienti di determinazione sono rispettivamente pari al 77% e 78%.

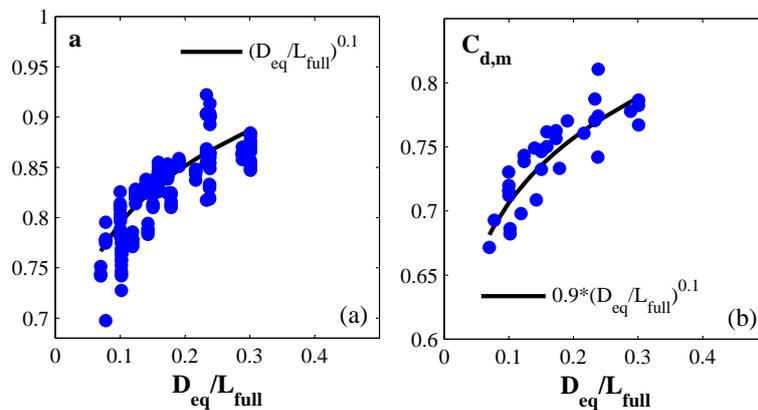


Figura 11.21: Andamento del parametro  $a$  (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti  $C_{d,m}$  (b) in funzione del rapporto  $D_{eq}/L_{full}$ . Le due curve hanno rispettivamente  $R^2 = 70\%$  e  $R^2 = 75\%$ .

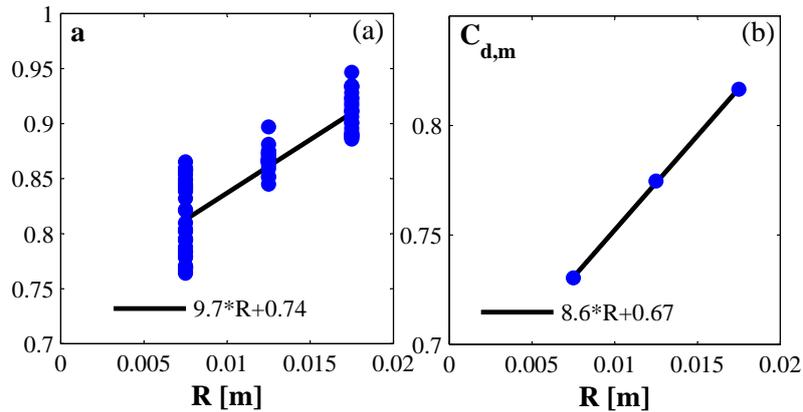


Figura 11.22: Andamento del parametro  $a$  (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti  $C_{d,m}$  (b) in funzione del raggio idraulico  $R$ . Le due curve hanno rispettivamente  $R^2 = 67\%$  e  $R^2 = 77\%$

### 11.4.3 Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$

Per quanto riguarda infine le configurazioni dotate di aeroforo con  $n < 3$ , fissato il valore di  $b$  e  $c$ , l'analisi dimensionale fornisce dei valori di  $a$  che risultano dipendere non tanto dal rapporto  $D_{eq}/L_{full}$ , quanto dalla variabile dimensionale rappresentativa della sezione, che è stata scelta essere il raggio idraulico  $R$ , come mostrato in Fig. 11.22(a); analogamente, il coefficiente di portata varia con  $R$  seguendo, a meno di una costante, esattamente la stessa legge lineare (si ha infatti  $8.6 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi/4 = 9.7$  e  $0.67 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi/4 = 0.74$ ), come illustrato in Fig. 11.22(b).

## 11.5 Regime di *non full flow*

Data l'elevata instabilità del regime *transitional*, nonché il numero esiguo di punti sperimentali relativi sia a questo regime che al *weir flow*, effettuare un'analisi approfondita appare poco significativo. In via cautelativa, dunque, si preferisce fornire delle equazioni che possano rappresentare sia il *weir flow* sia l'involuppo del *transitional flow*, esplicitandone il limite superiore e quello inferiore e distinguendo tra le configurazioni dotate o meno di aeroforo. Al fine di poter essere adoperate in fase di progettazione, le relazioni proposte sono fornite in forma adimensionale; a tale scopo, appare utile affiancare alle immagini già proposte una rappresentazione dei dati in forma adimensionale, con particolare riferimento alle variabili  $Q/\sqrt{gD_{eq}^5}$  e  $h/D_{eq}$ .

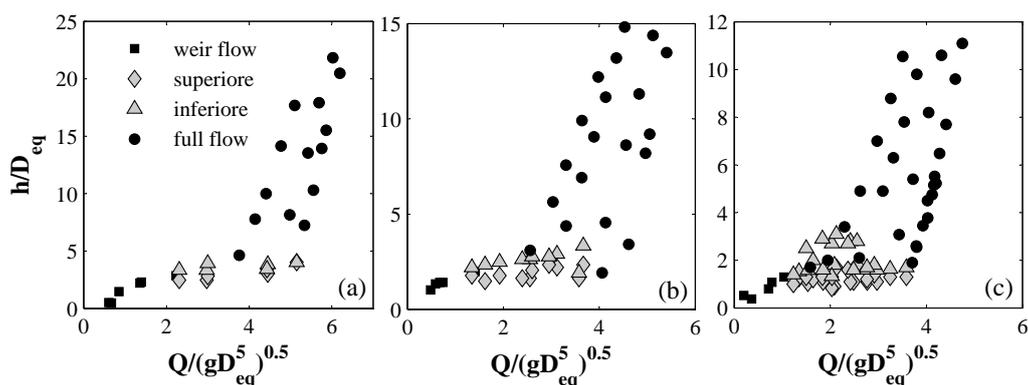


Figura 11.23: Scale di deflusso adimensionali per le configurazioni prive di aeroforo: DN50 (a), DN70 (b) e DN100 (c).

### 11.5.1 Configurazioni prive di aeroforo

La Fig. 11.23 mostra i dati sperimentali opportunamente adimensionalizzati; si può notare che non risultano particolari differenze tra i vari diametri, a meno di un leggero aumento nell'ampiezza della fascia *transitional* per il DN100. La Fig. 11.24 mostra invece una sintesi complessiva dei dati sperimentali, distinguendo tra quattro tipologie corrispondenti al *full flow*, al limite superiore del *transitional flow*, al suo limite inferiore, e al *weir flow*. In analogia con l'efflusso a stramazzo, si propone la seguente relazione per il *weir flow*:

$$\frac{h}{D_{eq}} = 1.5 \cdot \left( \frac{Q}{\sqrt{gD_{eq}^5}} \right)^{2/3} \quad (11.31)$$

valida per  $h/D_{eq} < 1$ . Per  $h/D_{eq} > 1$  le seguenti equazioni descrivono invece rispettivamente il limite superiore e quello inferiore della fascia di variabilità del *transitional flow*:

$$\frac{h}{D_{eq}} = 2 \cdot \left( \frac{Q}{\sqrt{gD_{eq}^5}} \right)^{1/2} \quad (11.32)$$

$$\frac{h}{D_{eq}} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{Q}{\sqrt{gD_{eq}^5}} \right)^{1/2} \quad (11.33)$$

Tali equazioni sono mostrate in Fig. 11.24 insieme ai dati sperimentali.

### 11.5.2 Configurazioni dotate di aeroforo

Per tali configurazioni i dati sperimentali sono mostrati, in forma adimensionale, in Fig. 11.25, da cui non si evincono sistematiche variabilità relative al regime di *transitional flow* a meno di una diminuzione della variabilità *transitional* in corrispondenza delle sezioni idriche inferiori (DN70 DN50 e

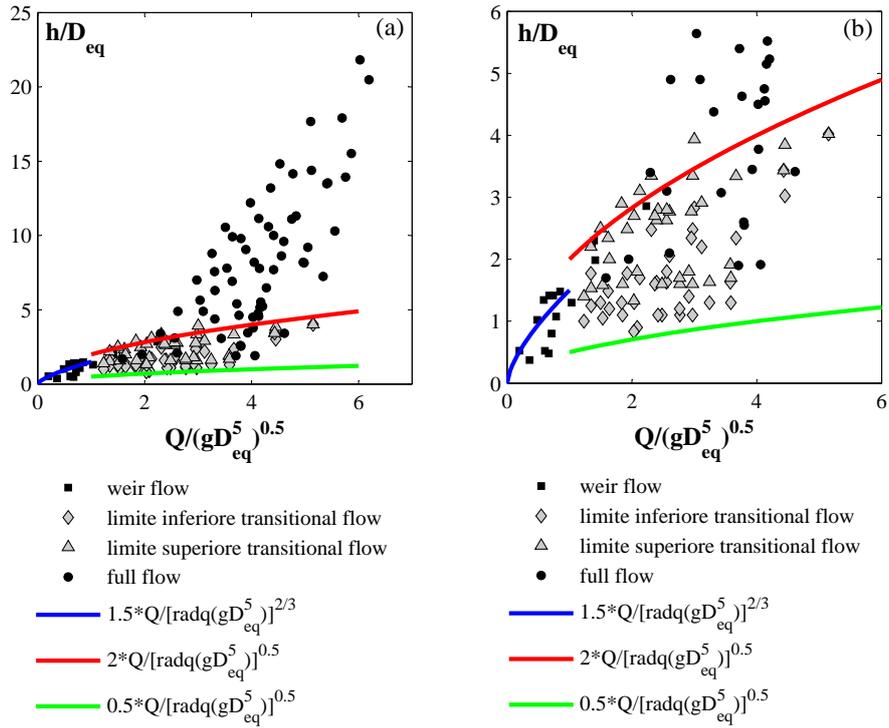


Figura 11.24: Sintesi delle configurazioni prive di aeroforo (a) e zoom sul regime *weir* e *transitional* (b); in evidenza le Eq. (11.31), (11.32) e (11.33).

DN70 dN30). È dunque lecito ipotizzare un'unica curva rappresentativa del regime di *weir flow*; in particolare, risulta ancora valida l'Eq. (11.31), così come l'Eq. (11.33) per rappresentare il limite inferiore della fascia di variabilità. Per il corrispondente limite superiore si può invece adoperare la seguente relazione:

$$\frac{h}{D_{eq}} = 2.5 \cdot \left( \frac{Q}{\sqrt{gD_{eq}^5}} \right)^{1/2} \quad (11.34)$$

rappresentata, insieme alle Eqq. (11.31) e (11.33), in Fig. 11.26.

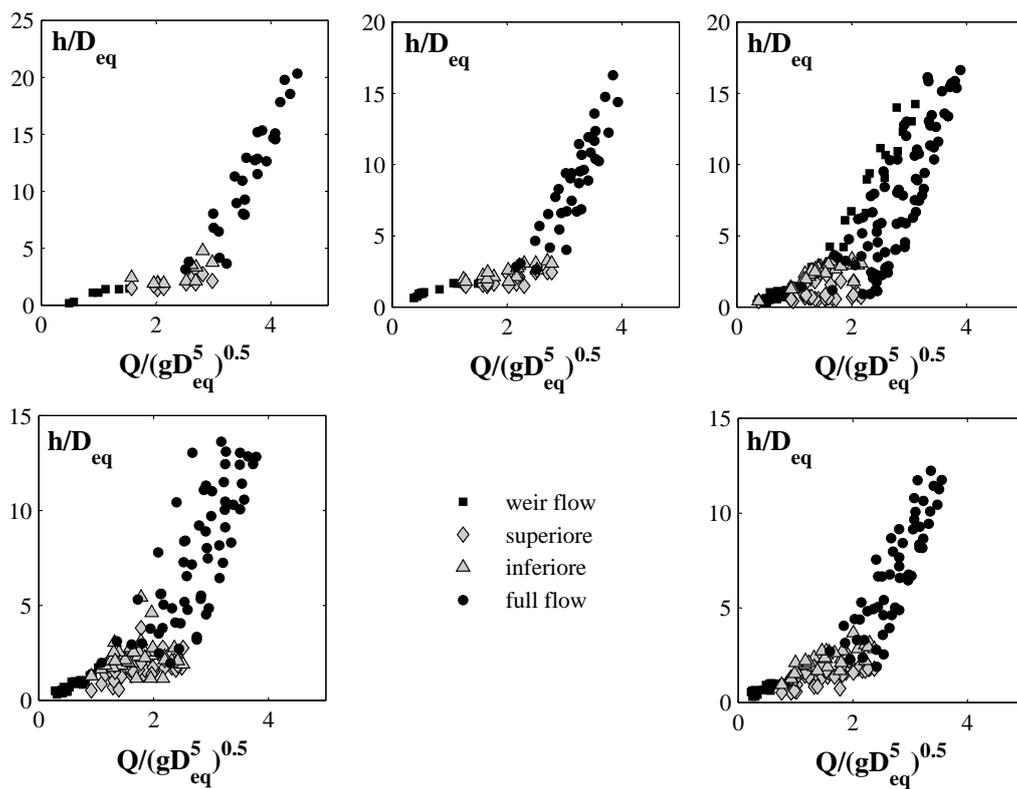


Figura 11.25: Scale di deflusso adimensionali per le configurazioni dotate di aeroforo: DN70 dN50 (a), DN70 dN30 (b), DN100 dN70 (c), DN100 dN50 (d) e DN100 dN30 (e).

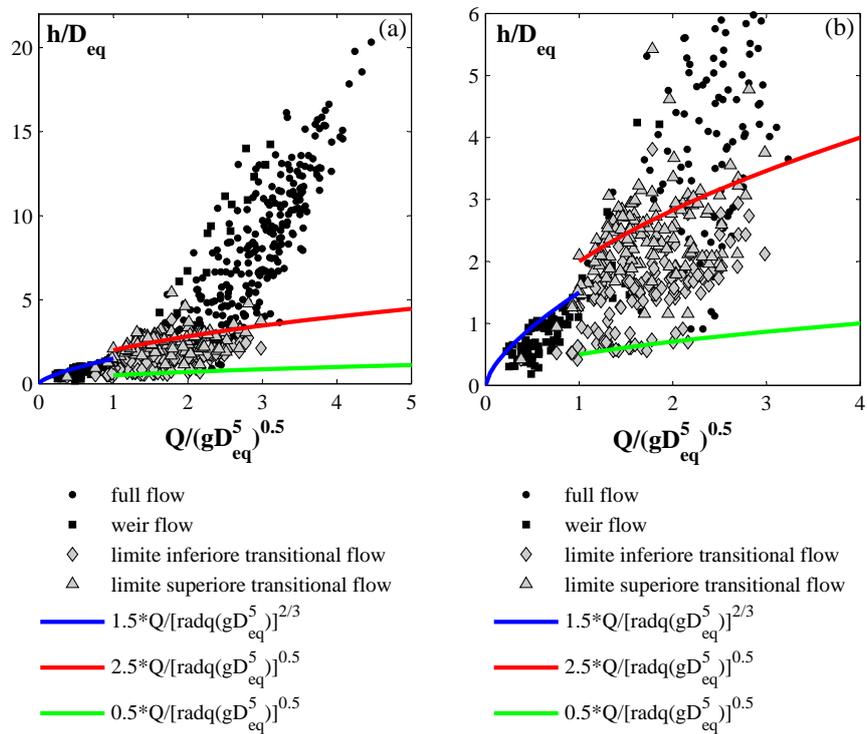


Figura 11.26: Sintesi delle configurazioni dotate di aeroforo (a) e zoom sul regime *weir* e *transitional* (b); in evidenza le Eq. (11.31), (11.34) e (11.33).

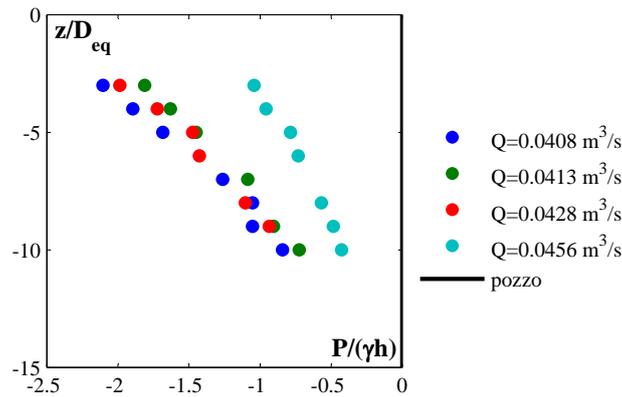


Figura 11.27: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 31, 28, 21, 20: DN100, LN1.5.

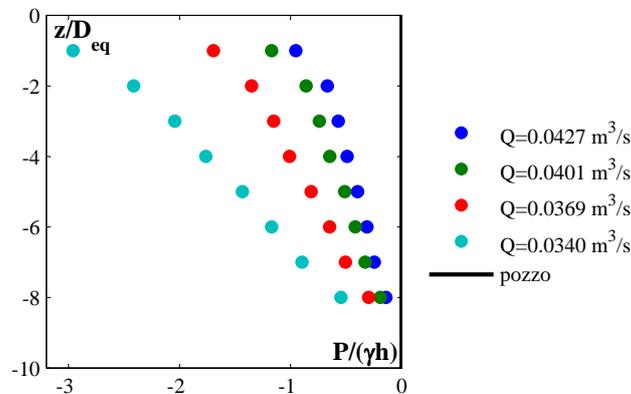


Figura 11.28: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 378, 379, 380, 381: DN100, LN1.

## 11.6 Adimensionalizzazione delle pressioni

In analogia con la teoria dei tubi addizionali esterni orizzontali, si propone un'adimensionalizzazione delle misure di pressione che presenta in ascissa il rapporto  $P/(\gamma h)$  e in ordinata il rapporto  $z/D_{eq}$ . Nelle Figg. 11.27 e 11.30 è mostrato l'andamento delle pressioni adimensionali per le configurazioni prive di aeroforo, con LN1.5; nelle Figg. 11.28 e 11.31 è mostrato l'andamento delle pressioni adimensionali per le configurazioni prive di aeroforo, con LN1; nelle Figg. 11.29 e 11.32 è infine mostrato l'andamento delle pressioni adimensionali per le configurazioni prive di aeroforo, con LN0.5. Per quanto concerne invece le configurazioni dotate di aeroforo, il relativo andamento delle pressioni adimensionali è illustrato nelle Figg. 11.33, 11.34 e 11.35 per LN1.5, e nelle Figg. 11.36, 11.37 e 11.38 per LN1.

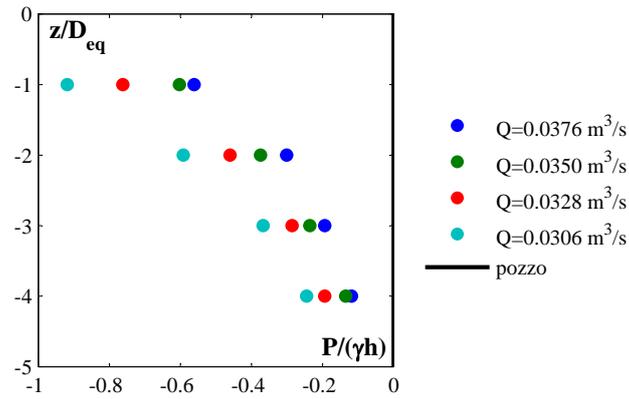


Figura 11.29: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 477, 478, 479, 480: DN100, LN0.5.

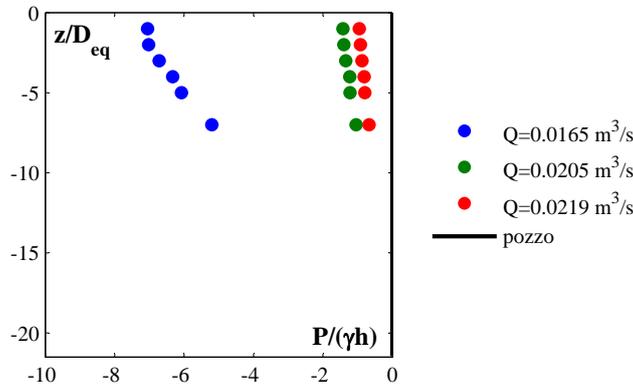


Figura 11.30: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 508, 514, 506: DN70, LN1.5.

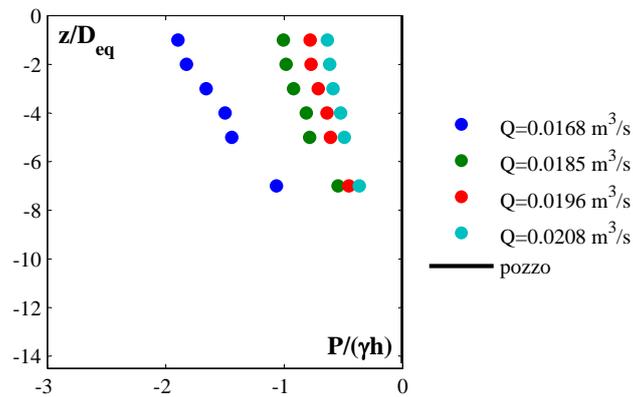


Figura 11.31: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 560, 561, 562, 563: DN70, LN1.

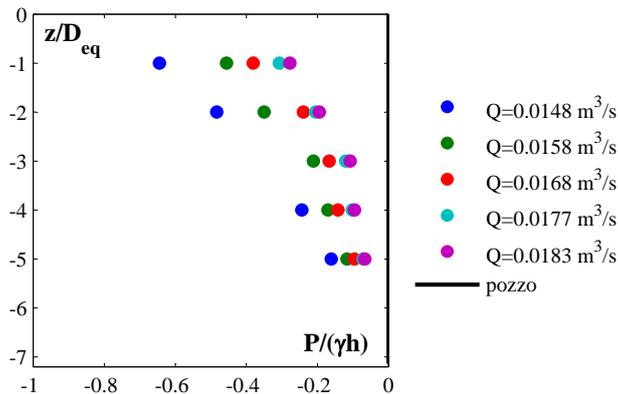


Figura 11.32: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 612, 611, 610, 609, 608: DN70, LN0.5.

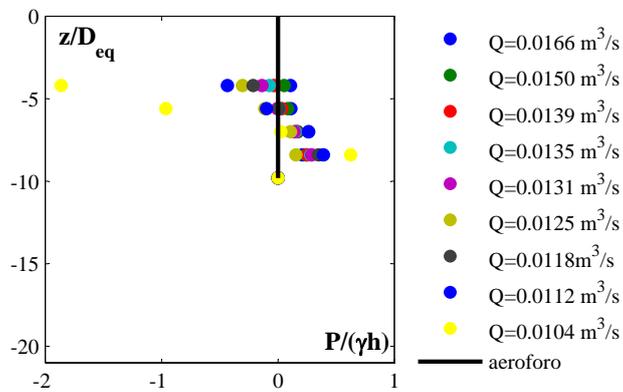


Figura 11.33: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79: DN100, LN1.5, dN70,  $n = 7$ .

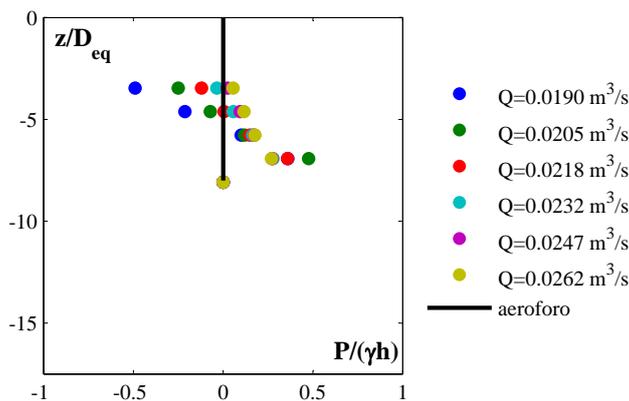


Figura 11.34: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 155, 150, 151, 152, 153, 154: DN100, LN1.5, dN50,  $n = 7$ .

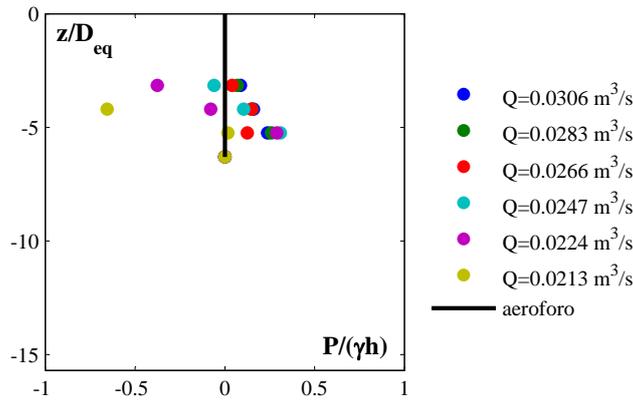


Figura 11.35: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 200, 201, 202, 203, 204, 205: DN100, LN1.5, dN30,  $n = 6$ .

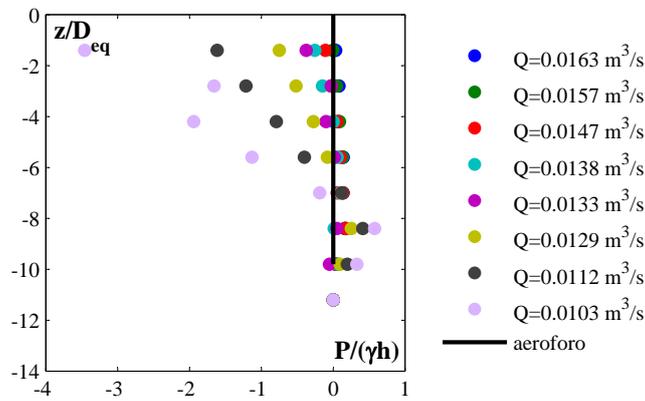


Figura 11.36: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 250, 251, 252, 253, 249, 254, 255, 256: DN100, LN1, dN70,  $n = 7$ .

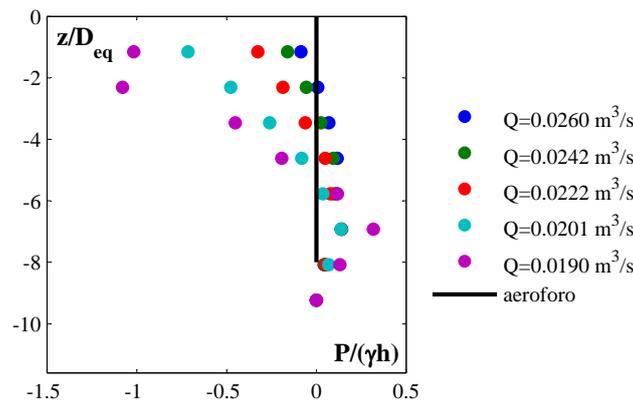


Figura 11.37: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 297, 298, 299, 300, 307: DN100, LN1, dN50,  $n = 7$ .

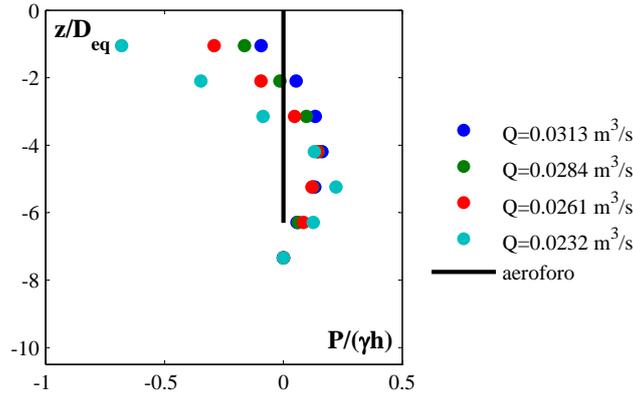


Figura 11.38: Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 342, 3443, 344, 345: DN100, LN1, dN30,  $n = 6$ .

## 11.7 Richiesta d'aria

Le misure relative alla portata d'aria richiamata nel manufatto attraverso il sistema di ventilazione, già illustrate nel capitolo dedicato all'analisi dei dati sperimentali, mettono in evidenza come, a parità di portata defluente, purché in regime di *full flow*, la portata d'aria in ingresso sia tanto maggiore quanto minore è l'affondamento dell'aeroforo. In particolare, dalla Fig. 11.39(a) si può notare come le rette rappresentative della relazione  $Q_a = f(Q)$  al variare di  $n$  siano tutte parallele tra loro. Si propone inoltre una adimensionalizzazione dei risultati secondo Hager (2010), interpretando il rapporto  $Q_a/Q$  come funzione della portata liquida specifica, definita come segue:

$$q = \frac{Q}{D_{eq}^2 \cdot (D - d)^{2/3}} \quad (11.35)$$

I risultati sono illustrati in Fig. 11.39(b), dove la funzione  $Q_a/Q = f(q)$  risulta parametrica rispetto al rapporto  $L_{full}/D_{eq}$ .

## 11.8 Analisi del *Borda free flow*

A scopo di completezza, si riportano in questo paragrafo i risultati relativi all'analisi delle configurazioni che hanno manifestato un regime di deflusso cosiddetto di *Borda free flow*. Si ricorda che tale regime è caratterizzato dal distacco del getto dalle pareti del tubo, cosicché la lunghezza del pozzo diventa ininfluente ai fini del deflusso, che è in sostanza assimilabile a un efflusso a battente in parete sottile. In analogia con quest'ultimo, l'equazione che governa il deflusso è la seguente:

$$Q = \mu \cdot \sigma \sqrt{2gh} \quad (11.36)$$

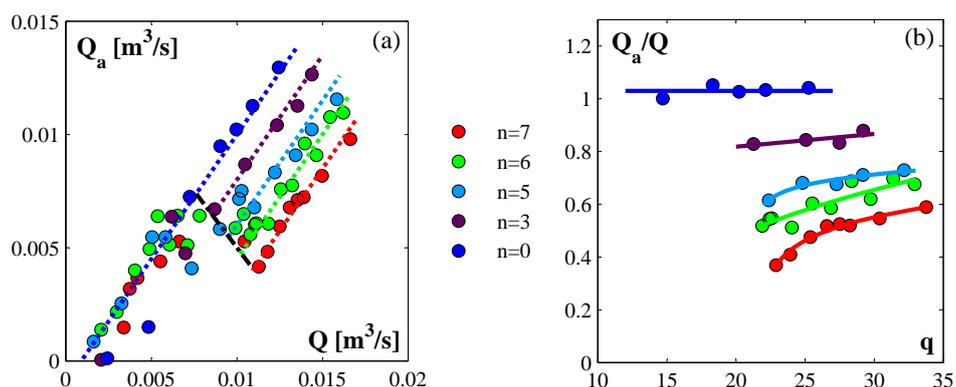


Figura 11.39: Misure sperimentali della portata d'aria relative alle configurazioni caratterizzate da DN100, dN70, LN1.5 (a) e relativa adimensionalizzazione (b).

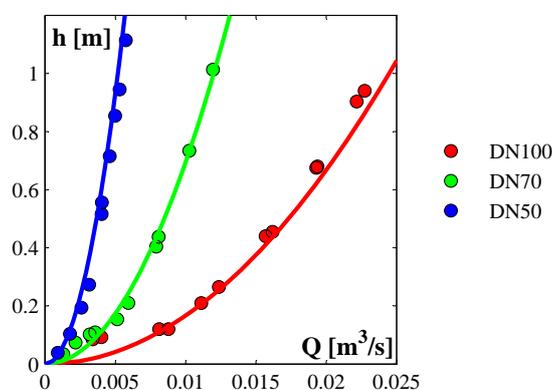


Figura 11.40: Regime di *Borda free flow*: confronto tra i dati sperimentali e l'Eq. (11.36) con  $\mu = 0.70$ .

dove  $\sigma$  è la sezione della luce,  $h$  è il carico sulla luce e  $\mu$  è il coefficiente di efflusso, prodotto del coefficiente di contrazione  $C_c$  e del coefficiente di velocità  $C_v$ , e generalmente posto pari a 0.61 (Citrini e Nosedà, 1994; Carravetta e Martino, 2013) ma che presenta una debole dipendenza sia dall'entità del carico che dalla forma della luce.

L'analisi dei dati sperimentali fornisce per i tre diametri tre diversi valori di  $\mu$ , con un valore medio pari a 0.70; con riferimento a tale valore, l'Eq. (11.36) è rappresentata in Fig. 11.40 per i tre diversi valori di sezione.

## 11.9 Considerazioni finali

Alla luce delle elaborazioni effettuate nel presente capitolo, si intende trarre delle conclusioni circa le equazioni che governano il deflusso attraverso un pozzo verticale con imbocco a spigolo vivo; verranno dunque proposte del-

le espressioni adimensionali per le relazioni già illustrate, che siano le più generali possibili al fine di poter essere adoperate come criteri di progettazione di questo manufatto. A tale scopo si introducono, in analogia con Padulano *e altri* (2013) e Hager e Del Giudice (1998), le seguenti variabili adimensionali:

$$F_D = \frac{Q}{\sqrt{gD_{eq}^5}} \quad (11.37)$$

$$Y = \frac{h}{D_{eq}} \quad (11.38)$$

$$\lambda = \frac{L_{full}}{D_{eq}} \quad (11.39)$$

$$\Theta = \frac{D_{eq}}{D - d} \quad (11.40)$$

### 11.9.1 Configurazioni prive di aeroforo

Qualora il sistema di ventilazione non sia impiegato, i diversi regimi di deflusso al variare della portata sono descritti dalle seguenti equazioni:

$$\textit{weir flow} \quad Y = \frac{3}{2} \cdot F_D^{2/3} \quad (11.41)$$

$$\textit{transitional flow: limite inferiore} \quad Y = \frac{1}{2} \cdot F_D^{1/2} \quad (11.42)$$

$$\textit{transitional flow: limite superiore} \quad Y = 2 \cdot F_D^{1/2} \quad (11.43)$$

$$\textit{full flow} \quad F_D = 1.11 \cdot \left[ \frac{Y + \lambda}{1.224 + f \cdot (\lambda - 2)} \right]^{1/2} \quad (11.44)$$

dove  $f$  è l'indice di attrito, funzione del numero di Reynolds  $Re$  della corrente e della legge di resistenza scelta. Nel caso in cui sia valida l'ipotesi di tubo idraulicamente liscio, l'Eq. (11.44) si specializza nella seguente:

$$[1 - 0.0047\lambda] \cdot [Y + \lambda]^{1/2} \quad (11.45)$$

Nel piano adimensionale  $(F_D, Y)$  le Eqq. (11.41), (11.42) e (11.43) sono rappresentate da tre curve univoche (Fig. 11.41), mentre l'Eq. (11.44) è parametrica rispetto a  $\lambda$ ; si nota in particolare come, all'aumentare di  $\lambda$ , le curve rappresentative del *full flow* abbiano un andamento subverticale, tale che ad un modesto incremento di  $F_D$  corrisponde una variazione di  $Y$  tanto maggiore quanto maggiore è  $\lambda$ . Con riferimento alla Fig. 11.41. è possibile tracciare il deflusso di un pozzo caratterizzato da particolari valori di diametro e lunghezza: partendo dall'origine degli assi, il punto di coordinate  $(F_D, Y)$  muoverà, all'aumentare della portata, sulla curva rappresentativa del *weir flow* fino a valori di  $F_D$  circa pari a 1, oltrepassato il quale avrà inizio

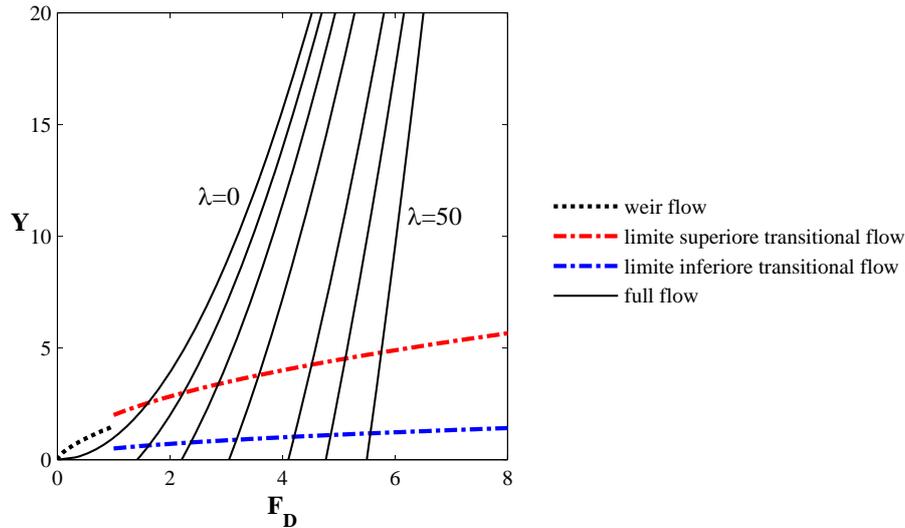


Figura 11.41: Regimi di deflusso teorici in assenza di aeroforo.

una fase oscillatoria i cui estremi, in termini di tirante, sono rappresentati dalle curve delimitanti il *transitional flow*; quindi, per ulteriori aumenti di portata, il punto percorrerà la fascia di transizione fino all'intersezione di questa con la curva di *full flow* relativa allo specifico valore di  $\lambda$ . Superato il punto di intersezione, il punto si porterà sulla curva di *full flow* e la percorrerà all'ulteriore aumentare della portata. Si noti che il passaggio al regime di *full flow* si ha per valori sempre più elevati di  $F_D$  e  $Y$  quanto maggiore è  $\lambda$ ; in altre parole, pozzi molto corti e di grande diametro entreranno in *full flow* per valori inferiori di  $F_D$ , viceversa pozzi di grande lunghezza e piccolo diametro funzioneranno in regime di *non full flow* per un campo maggiore di  $F_D$ .

### 11.9.2 Configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$

Qualora si impieghi un sistema di ventilazione consistente in un tubo aeroforo coassiale al pozzo, con un grado di affondamento almeno pari a tre volte il diametro del pozzo, i diversi regimi di deflusso al variare della portata sono descritti dalle seguenti equazioni:

$$\text{weir flow} \quad Y = \frac{3}{2} \cdot F_D^{2/3} \quad (11.46)$$

$$\text{transitional flow: limite inferiore} \quad Y = \frac{1}{2} \cdot F_D^{1/2} \quad (11.47)$$

$$\text{transitional flow: limite superiore} \quad Y = \frac{5}{2} \cdot F_D^{1/2} \quad (11.48)$$

$$\text{full flow} \quad F_D = 1.11 \cdot \left[ \frac{Y + \lambda}{1.65 + f \cdot (\lambda\Theta - 2)} \right]^{1/2} \quad (11.49)$$

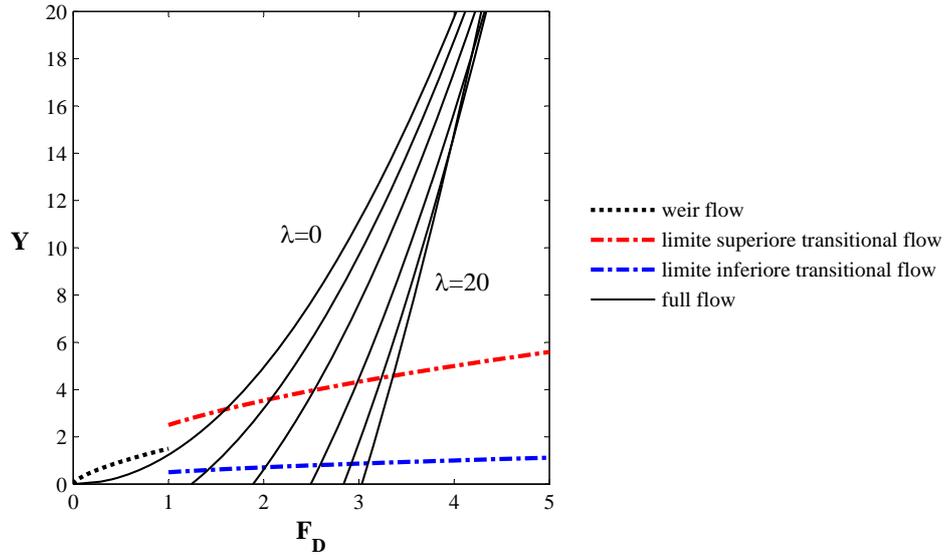


Figura 11.42: Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con  $n \geq 3$ .

Qualora si possa ritenere valida la teoria dei tubi lisci, l'Eq. (11.49) si specializza nella seguente:

$$[0.9 - 0.0011\lambda] \cdot [Y + \lambda]^{1/2} \quad (11.50)$$

Le Eqq. (11.46), (11.47), (11.48) e (11.49) sono rappresentate in Fig. 11.42, per la quale valgono le stesse considerazioni fatte per la Fig. 11.41. Si noti in particolare che già per  $\lambda = 20$  si verifica una riduzione di capacità del manufatto dovuta alle forti perdite di carico distribuite, che diventano preponderanti rispetto al carico sulla sezione di sbocco; ciò si verifica per valori di  $Y$  nell'ordine di 20, dunque non troppo alti, mentre in assenza di aeroforo lo stesso fenomeno si verifica per valori di  $Y$  molto più alti, non visibili in Fig. 11.41.

### 11.9.3 Configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$

Qualora si impieghi un sistema di ventilazione consistente in un tubo aeroforo coassiale al pozzo, con un grado di affondamento inferiore a tre volte il diametro del pozzo, i diversi regimi di deflusso al variare della portata sono descritti dalle seguenti equazioni:

$$\textit{weir flow} \quad Y = \frac{3}{2} \cdot F_D^{2/3} \quad (11.51)$$

$$\textit{transitional flow: limite inferiore} \quad Y = \frac{1}{2} \cdot F_D^{1/2} \quad (11.52)$$

$$\textit{transitional flow: limite superiore} \quad Y = \frac{5}{2} \cdot F_D^{1/2} \quad (11.53)$$

$$\text{full flow } F_D = 1.11 \cdot \left[ \frac{Y + \lambda}{2.07 - 32R + f \cdot (\lambda\Theta - 2)} \right]^{1/2} \quad (11.54)$$

Qualora si possa ritenere valida la teoria dei tubi lisci, l'Eq. (11.49) si specializza nella seguente:

$$[0.75 + 8R] \cdot [Y + \lambda]^{1/2} \quad (11.55)$$

L'Eq. (11.54) e la sua equivalente Eq. (11.55) sono parametriche non solo rispetto a  $\lambda$ , ma anche rispetto al raggio idraulico  $R$ ; nelle Figg. 11.43 e 11.44 sono mostrate le Eqq. (11.51), (11.52), (11.53) e (11.54) corrispondenti rispettivamente a valori di  $R$  pari a 0.8 cm e 1.8 cm. Si noti come, a parità di portata e di  $\lambda$ , si abbia un valore di  $Y$  inferiore per il pozzo caratterizzato dal raggio idraulico più ampio; ciò è naturalmente coerente con la considerazione, avallata dai dati sperimentali, che la capacità del pozzo aumenta all'aumentare della sezione utile al deflusso.

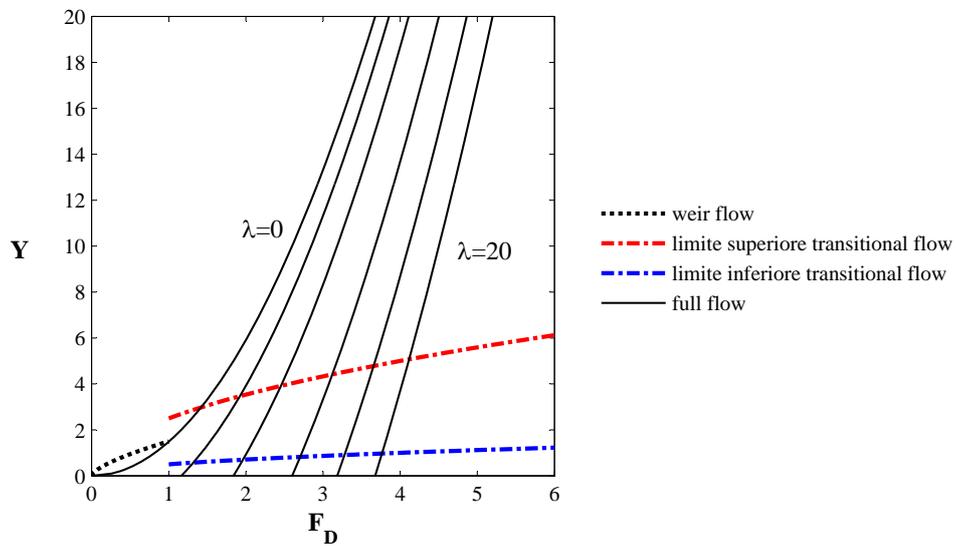


Figura 11.43: Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con  $n < 3$  e  $R = 0.8$  cm.

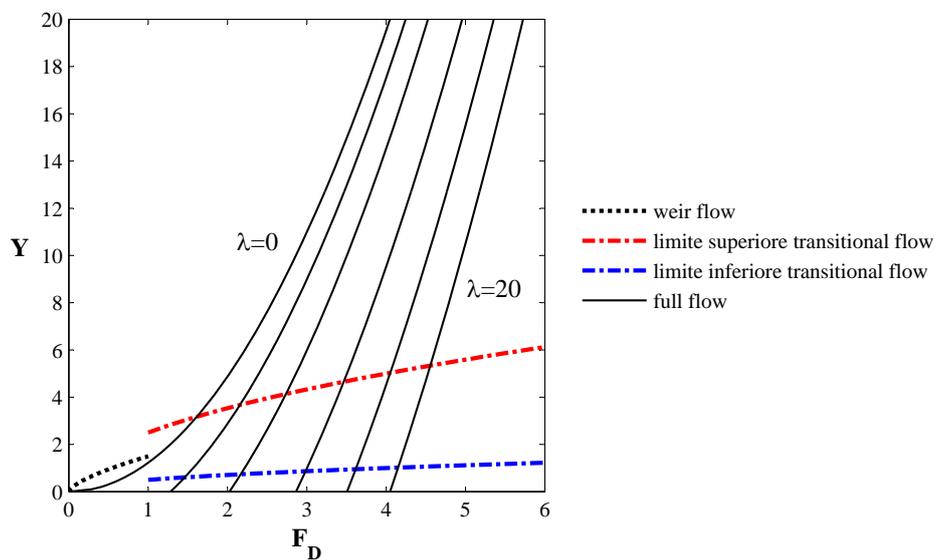


Figura 11.44: Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con  $n < 3$  e  $R = 1.8$  cm.

## Conclusioni

Se i miei calcoli sono esatti,  
 quando questo aggeggio  
 toccherà le 88 miglia orarie ne  
 vedremo delle belle, Marty!

---

*Ritorno al Futuro, 1985*

Scopo della sperimentazione è la comprensione del fenomeno del deflusso attraverso un pozzo verticale con imbocco a spigolo vivo, manufatto per il quale non esistono ad oggi adeguati criteri di progettazione ma solo considerazioni generali mutate da studi sperimentali su manufatti analoghi.

Dall'analisi sperimentale è risultato che, al variare della portata, sono possibili tre diversi regimi di deflusso, descritti come segue:

- **full flow**: tale regime, possibile per valori elevati di portata e tirante, coincide di fatto con la condizione di deflusso in pressione del pozzo verticale. Il pozzo è dunque occupato dal fluido per il suo intero volume, senza visibile intrappolamento di sacche d'aria; il moto è gradualmente variato e le pressioni sono distribuite in maniera pressoché lineare lungo l'asse, a meno di discontinuità indotte da eventuali perdite di carico localizzate.
- **weir flow**: tale regime, possibile solo per valori molto modesti di portata e tirante, è assimilabile ad un efflusso a stramazzo da luce circolare, a meno della presenza di un vortice stabile in corrispondenza della sezione di imbocco, che determina l'ingresso del fluido nel pozzo secondo traiettorie elicoidali. Il pozzo è occupato da una miscela di aria e acqua, e le pressioni lungo l'asse sono pari alla pressione atmosferica.
- **transitional flow**: tale regime è il risultato di una alternanza ciclica tra il *weir flow* e il *full flow*: parallelamente, le grandezze caratteristiche, quali tiranti e pressioni, variano nel tempo, necessitando pertanto

di un monitoraggio in continuo. Si distingue in particolar modo una fase di discesa del tirante, in cui il pozzo è pressurizzato e non è visibile alcuna sezione contratta, e una fase di risalita, in cui il pozzo, occupato da una miscela di aria e acqua, si trova in pressione atmosferica, ed è ben visibile una sezione contratta in corrispondenza dell'imbocco. Dal monitoraggio delle variabili risultano particolarmente significativi i valori massimi e minimi assunti dal carico sulla luce per ciascun valore di portata.

È inoltre da segnalare la frequente presenza di vortici a tutti i diversi stadi di sviluppo; particolare attenzione destano naturalmente gli *air core vortices* ovvero i vortici completamente sviluppati, che determinano un intrappolamento di aria nel pozzo con conseguente significativa diminuzione delle pressioni lungo l'asse e variazione del tirante in vasca. La formazione dei vortici è risultata possibile in tutti i regimi di deflusso; la loro influenza sul regime di pressioni è però risultata particolarmente deleteria nell'ambito del *full flow*. Per quanto concerne invece il *transitional flow*, i fenomeni vorticosi sono presumibilmente i principali responsabili dell'ingresso di aria nel pozzo, cosa che rende possibile il passaggio tra il regime di *full flow* e quello di *weir flow* caratteristico di tale oscillazione.

L'elaborazione dei dati sperimentali ha avuto come scopo principale l'analisi della scala di deflusso del manufatto; è risultato che essa può essere distinta in due rami ben diversi, uno superiore caratteristico del *full flow*, caratterizzato da notevoli variazioni di tirante a fronte di modeste variazioni di portata, e uno inferiore, costituito sia dai punti in *weir flow* che da quelli in *transitional flow*, in cui una variazione anche significativa di portata comporta solo lievi variazioni nel tirante. Il ramo inferiore può essere a sua volta distinto in due segmenti, il primo costituito dai punti in regime di *weir flow*, caratterizzati da valori univoci di tirante e portata, e il secondo costituito dai punti di tipo *transitional*, in cui ad ogni valore di portata è associato un valore massimo e uno minimo di tirante, cosa che consente di definire una fascia di variazione del carico. L'analisi numerica della scala di deflusso del pozzo è stata condotta separatamente per il ramo inferiore e quello superiore; in particolare, è stato possibile condurre uno studio fisicamente basato sul *full flow* mediante l'applicazione del teorema di Bernoulli, mentre per il ramo inferiore, data l'elevata instabilità delle condizioni di deflusso, si è preferito un approccio empirico.

L'analisi del *full flow* è stata condotta ipotizzando la presenza di perdite di carico continue a partire da una distanza dall'imbocco del pozzo pari a 8 volte il raggio idraulico, e di una perdita localizzata di imbocco non trascurabile, che è stata tarata mediante i dati sperimentali. Tale perdita di carico è risultata essere circa pari al 22% dell'altezza cinetica nel pozzo nel caso in cui il sistema sia privo di ventilazione; nel caso invece in cui si adotti

un tubo aeroforo coassiale al pozzo, essa risulta pari a circa il 65% dell'altezza cinetica se l'aeroforo presenta un affondamento superiore a 3 volte il diametro del pozzo. In caso contrario, la perdita di carico manifesta valori decrescenti al crescere del raggio idraulico della sezione idrica, con un valore medio comunque analogo. Nei rispettivi tre casi, le Eqq. (11.44), (11.49) e (11.54) forniscono, in maniera adimensionale, l'equazione della scala di deflusso del manufatto, che costituisce il criterio di progettazione cercato relativo al regime di *full flow* grazie al quale è possibile assegnare al manufatto le dimensioni che consentano di scaricare un valore di portata prestabilito, ovvero, in maniera equivalente, di conoscere la capacità idraulica di un manufatto di assegnate dimensioni. Tali equazioni, rappresentabili nel piano  $(F_D, Y)$ , sono parametriche rispetto al rapporto  $\lambda = L_{full}/D_{eq}$ . Si nota in particolare che, a parità di carico sulla luce, la capacità aumenta all'aumentare della sezione e della lunghezza del pozzo; in presenza di aeroforo, ciò si traduce nell'aumentare il suo l'affondamento e ridurre il diametro. A parità di dimensioni del pozzo, la presenza di aeroforo ne riduce senz'altro la capacità; tuttavia, non è trascurabile l'effetto benefico del sistema di ventilazione sia sul regime di pressioni lungo il pozzo, che risultano considerevolmente aumentate e dunque lontane dai valori di cavitazione, sia sull'abbattimento dei fenomeni vorticosi, che risultano quasi del tutto impediti in regime di *full flow* con un generale incremento della stabilità del manufatto.

Per quanto concerne il *weir flow*, l'Eq. (11.41) fornisce la relazione adimensionale che descrive il deflusso nel pozzo sia in presenza che in assenza di aeroforo. Per il regime *transitional* sono invece state ricavate le relazioni adimensionali caratteristiche del limite superiore e di quello inferiore della fascia di variabilità: il limite inferiore è descritto dall'Eq. (11.42) sia in presenza che in assenza di aeroforo, mentre il limite superiore è descritto dall'Eq. (11.43) in assenza e dall'Eq. (11.48) in presenza di ventilazione. I valori di portata e di tirante per cui si verifica il passaggio dal *transitional* al *full flow* sono, in via cautelativa, quelli corrispondenti all'intersezione tra la curva di *full flow* e quella relativa al limite superiore del *transitional flow* per assegnate dimensioni del manufatto.

# Bibliografia

- American Public Works Association (1970). *Combined sewer regulation and management: a manual of practice*. Water Pollution Control Research Series. US Federal Water Quality Administration, Department of the Interior.
- Anderson A. G.; Vaidyaraman P.; Chu C. (1971). Hydraulics of long vertical conduits and associated cavitation. Water Pollution Control Research Report, Environmental Protection Agency, Project Report No 122, St. Anthony Falls Hydraulics Laboratory, University of Minnesota.
- Anwar H. O. (1965). Coefficients of discharge for gravity flow into vertical pipes. *Journal of Hydraulic Research*, **3**(1), 1–19.
- Anwar H. O. (1966). Formation of a weak vortex. *Water Power*, **1**.
- Anwar H. O. (1968). Vortices in a viscous fluid. *Journal IAHR*, **1**.
- Biggiero V. (1969). Scaricatori di piena per fognature. Criteri di progettazione. *Ingegneri (Periodico degli Ingegneri della Provincia di Napoli)*, **57**.
- Binnie A. (1938). The use of a vertical pipe as an overflow for a large tank. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, **168**(933), 219–237.
- Buckingham E. (1915). Model experiments and the forms of empirical equations. *ASME Transactions*, **37**, 263–296.
- Carravetta A.; Martino R. (2013). *Dispense di Idraulica*. Fridericiana Editrice Universitaria, Napoli.
- Chanson H. (2004). *The Hydraulics of open channel flow: an introduction*. Elsevier, 2 edizione.

- Citrini D. (1982). Spunti di teoria dei derivatori frontali. *Ingegneria Ambientale*, **11**(4).
- Citrini D.; Nosedà G. (1994). *Idraulica*. C.E.A., Milano.
- Cozzo G. (1979). Determinazioni sperimentali sui derivatori frontali in canali a sezione rettangolare. In *Memorie e studi dell'Istituto di Idraulica del Politecnico di Milano*, numero 248.
- Cozzo G. (1986). Derivatori frontali per reti di fognatura. In *Tecniche per la difesa dall'inquinamento* in Atti del VII corso di aggiornamento, numero 248, pp. 333–375. Editoriale BIOS.
- Daggett L. L.; Keulegan G. H. (1974). Similitude in free-surface vortex formation. *Journal of Hydraulic Division*, **100**(HY11).
- Del Giudice G.; Gisonni C. (2011). Vortex dropshaft retrofitting: case of Naples city (Italy). *Journal of Hydraulic Research*, **49**(16), 804–808.
- Del Giudice G.; Gisonni C.; Rasulo G. (2010). Design of a scroll vortex inlet for supercritical approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, **136**(10), 837–841.
- Del Giudice G.; Padulano R.; Carravetta A. (2013). Novel diversion structure for supercritical flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, **139**, 84–87.
- Durgin W. W.; Hecker G. E. (1978). The modelling of vortices at intake structures. In *Proc. IAHR-ASME-ASCE Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery*, CSU Fort Collins. Vol. I e III.
- Fattor C. A.; Bacchiega J. D. (2001). Analysis of instabilities in the change of regime in morning-glory spillways. In *XXVIII IAHR Congress*, Beijing, China.
- Guo Q.; Song C. C. S. (1988). Hydraulic transient analysis of TARP phase II O'Hare system. Project Report 276, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory.
- Hager W. (2010). *Wastewater Hydraulics. Theory and Practice*. Springer, Berlin, 2 edizione.
- Hager W. H.; Del Giudice G. (1998). Generalized culvert design diagram. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **124**(5), 271–274.
- Heller V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, **49**(3), 293–306.

- Ippolito G. (1995). *Appunti di Costruzioni Idrauliche*. Liguori Editore, Napoli.
- Jan C.; Nguyen Q. (2009). Discharge coefficient for a water flow through a bottom orifice of a conical hopper. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **136**(8), 567–572.
- Khatsuria R. M. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. Civil and Environmental Engineering Series. Marcel Dekker, New York.
- Knauss J., (A cura di) (1987). *Swirling flow problems at intakes*. A.A. Balkema, Rotterdam, Germany.
- Lamb H. (1937). *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, Londra (UK), sesta edizione.
- Lamb O. P. (1949). Air entrainment in flowing water. Prepared for the Office of Naval Research Department of the Navy, Project Report No 19, St. Anthony Falls Hydraulics Laboratory, University of Minnesota.
- Marchi E. (1988). Correnti veloci in curve a 90° molto strette. *Idrotecnica*, **15**(6), 439–455.
- Mutti M.; Paoletti A. (2006). Baffled weirs in super-critical rectangular channels: some basic considerations. In *XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. IDRA.
- Novak P.; Guinot V.; Jeffrey A.; Reeve D. E. (2010). *Hydraulic modeling, an introduction: Principles, methods and applications*. Spon Press (an imprint of Taylor&Francis).
- Odgaard A. J. (1984). Fluid properties and their scale effects in Froude-scaled hydraulic models. In *Proceedings of the IAHR/DVWK Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*. Technische Akademie Esslingen.
- Padulano R.; Del Giudice G.; Carravetta A. (2013). Experimental analysis of a vertical drop shaft. *Water*, **5**(3), 1380–1392.
- Pulci Doria G. (2001). *Il corso di Idraulica a partire dallo sviluppo storico sociale della disciplina*. CUEN, 4 edizione.
- Rajaratnam N.; Mainali A.; Hsung C. Y. (1997). Observations on flow in vertical dropshafts in urban drainage systems. *Journal of Environmental Engineering*, **5**(123), 486–491.

- Rindels A. J.; Gulliver J. S. (1983). An experimental study of critical submergence to avoid free-surface vortices at vertical intakes. Prepared for the Legislative Commission on Minnesota Resources, Project Report No 224, St. Anthony Falls Hydraulics Laboratory, University of Minnesota.
- Robinson A.; Morvan H.; Eastwick C. (2010). Computational investigations into draining in an axisymmetric vessel. *Journal of Fluids Engineering*, **132**(12), 121104/1–121104/7.
- Russo Spena A. (1951). *Contributo sperimentale allo studio dell'efflusso da tubi addizionali cilindrici*, volume XVIII di 4. Rend. Acc. Scienze Fisiche e Met. Soc. Naz. Scienze, Lettere, Arti, Napoli, Italy. (In Italian).
- Stevens J.; Kolf R. (1959). Vortex flow through horizontal orifices. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **124**(1), 871–883.
- USBR (1987). *Design of small dams*. United States Bureau of Reclamation, Washington, DC.
- Viparelli M. (1961). Air and water currents in vertical shafts. *La Huille Blanche*, **16**(6), 857–869.
- Williams O. (1997). *Tunnels and Shafts in Rock*. U.S. Army Corps of Engineers, CECW-ED, Washington, DC. Manual No 1110-2-2901.
- Yildirim N.; Kocabas F. (1995). Critical submergence for intakes in open channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, **121**(12), 900–905.
- Yildirim N.; Kocabas F. (1998). Critical submergence for intakes in still-water reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, **124**(1), 103–104.

# Appendice A: Sperimentazione sul partitore semi-frontale

Tabella 12.1: Dati sperimentali

id prova	$i$	$B_1$ [m]	$d$ [m]	condizione esterna	condizione interna	stabile	$Q_0$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_1$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	$h_0$ [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	$h_3$ [m]	$F_0$	$F_1$
1	0.05	0.138	0.138	B	B	VERO	0.153	0.039	0.114	0.137	0.078	0.147	-	3.2	4.1
1	0.05	0.138	0.138	B	B	VERO	0.153	0.039	0.114	0.137	0.078	0.147	-	3.2	4.1
2	0.05	0.138	0.106	B	B	VERO	0.153	0.020	0.133	0.137	0.053	0.142	0.086	3.2	3.8
3	0.05	0.138	0.035	B	B	VERO	0.154	0.049	0.105	0.139	0.099	0.150	-	3.2	3.7
4	0.05	0.138	0.092	D	B	VERO	0.126	0.015	0.110	0.117	0.046	0.121	0.0848	3.4	3.6
5	0.05	0.138	0.06	B	B	VERO	0.126	0.033	0.093	0.117	0.067	0.125	-	3.3	4.3
6	0.05	0.138	0.031	B	B	VERO	0.126	0.046	0.080	0.117	0.096	0.125	0.017	3.3	3.6
7	0.05	0.138	0.031	A	B	FALSO	0.126	0.047	0.079	0.116	0.093	0.125	-	3.4	3.8
8	0.05	0.138	0.069	C	B	VERO	0.084	0.010	0.073	0.082	0.036	0.085	-	3.8	3.5
9	0.05	0.138	0.046	B	B	VERO	0.083	0.021	0.063	0.081	0.045	0.086	0.029	3.8	5.0
10	0.05	0.138	0.046	A	B	FALSO	0.083	0.021	0.063	0.080	0.044	0.085	-	3.9	5.2
11	0.05	0.138	0.046	B	A	FALSO	0.083	0.017	0.066	0.081	0.037	0.081	-	3.9	5.5
12	0.05	0.138	0.046	A	A	FALSO	0.083	0.017	0.066	0.081	0.036	0.080	-	3.8	5.7
13	0.05	0.138	0.023	B	B	VERO	0.083	0.030	0.053	0.082	0.071	0.087	0.012	3.8	3.7
14	0.05	0.138	0.023	A	A	FALSO	0.083	0.028	0.056	0.082	0.063	0.083	-	3.8	4.1
15	0.05	0.09	0.035	B	B	VERO	0.152	0.034	0.118	0.136	0.124	0.144	0.016	3.2	2.8
16	0.05	0.09	0.071	B	B	VERO	0.153	0.022	0.131	0.137	0.082	0.142	0.048	3.2	3.4
17	0.05	0.09	0.106	B	B	VERO	0.154	0.011	0.142	0.136	0.044	0.139	0.083	3.3	4.4
18	0.05	0.09	0.106	C	B	FALSO	0.154	0.011	0.142	0.136	0.050	0.140	-	3.3	3.6
19	0.05	0.09	0.069	B	B	VERO	0.084	0.006	0.078	0.082	0.025	0.083	0.05	3.8	5.4
20	0.05	0.09	0.046	B	B	VERO	0.087	0.013	0.073	0.084	0.052	0.087	0.028	3.8	4.0
21	0.05	0.09	0.023	B	B	VERO	0.084	0.019	0.065	0.082	0.076	0.086	0.0072	3.8	3.1
22	0.05	0.09	0.092	B	B	VERO	0.126	0.009	0.118	0.115	0.034	0.118	0.067	3.5	5.0
23	0.05	0.09	0.061	B	B	VERO	0.127	0.019	0.108	0.116	0.068	0.121	0.041	3.4	3.7
24	0.05	0.09	0.031	B	B	VERO	0.126	0.027	0.099	0.119	0.104	0.123	0.015	3.3	2.9
25	0.02	0.09	0.04	L	L	VERO	0.126	0.025	0.102	0.165	0.211	0.176	-	2.0	0.9
26	0.02	0.09	0.08	A	B	VERO	0.127	0.019	0.108	0.163	0.089	0.166	0.064	2.1	2.5
27	0.02	0.09	0.12	A	B	VERO	0.126	0.010	0.117	0.162	0.052	0.163	0.102	2.1	3.0
28	0.02	0.09	0.09	A	B	VERO	0.089	0.008	0.081	0.120	0.041	0.120	0.071	2.3	3.4
29	0.02	0.09	0.06	A	B	VERO	0.089	0.014	0.075	0.121	0.075	0.122	0.043	2.3	2.5
30	0.02	0.09	0.03	L	B	VERO	0.089	0.016	0.073	0.124	0.194	0.135	-	2.2	0.7
31	0.02	0.09	0.02	L	B	VERO	0.050	0.005	0.045	0.083	0.149	0.106	-	2.2	0.3

Dati sperimentali (*continua*)

id prova	$i$	$B_1$ [m]	$d$ [m]	condizione esterna	condizione interna	stabile	$Q_0$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_1$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_2$ [m <sup>3</sup> /s]	$h_0$ [m]	$h_1$ [m]	$h_2$ [m]	$h_3$ [m]	$F_0$	$F_1$
32	0.02	0.09	0.04	B	L	VERO	0.049	0.004	0.045	0.079	0.124	0.091	-	2.4	0.3
33	0.02	0.09	0.06	B	L	VERO	0.049	0.002	0.047	0.077	0.079	0.081	-	2.4	0.3
34	0.02	0.138	0.04	B	A	VERO	0.128	0.047	0.081	0.166	0.136	0.173	0.031	2.0	2.2
35	0.02	0.138	0.08	B	B	VERO	0.128	0.033	0.096	0.166	0.093	0.170	0.065	2.0	2.7
36	0.02	0.138	0.12	B	B	VERO	0.128	0.018	0.110	0.165	0.051	0.167	0.101	2.0	3.7
37	0.02	0.138	0.09	B	A	VERO	0.084	0.012	0.072	0.116	0.036	0.116	0.083	2.3	4.0
38	0.02	0.138	0.06	B	A	VERO	0.084	0.021	0.063	0.116	0.064	0.117	0.044	2.3	3.0
39	0.02	0.138	0.03	B	L	VERO	0.084	0.027	0.057	0.122	0.168	0.131	-	2.1	0.9
40	0.02	0.138	0.05	B	A	VERO	0.166	0.059	0.108	0.205	0.166	0.207	0.039	1.9	2.0
41	0.02	0.138	0.1	B	B	VERO	0.167	0.041	0.126	0.204	0.110	0.206	0.083	1.9	2.6
42	0.02	0.138	0.15	B	B	VERO	0.167	0.021	0.145	0.204	0.063	0.203	0.133	1.9	3.2
43	0.02	0.09	0.15	B	A	VERO	0.167	0.013	0.154	0.202	0.058	0.201	0.138	2.0	3.3
44	0.02	0.09	0.1	B	A	VERO	0.167	0.024	0.143	0.203	0.112	0.204	0.088	2.0	2.3
45	0.02	0.09	0.05	B	A	VERO	0.167	0.036	0.131	0.206	0.168	0.209	0.036	1.9	1.9
46	0.01	0.138	0.1	A	A	VERO	0.125	0.030	0.096	0.201	0.105	0.199	-	1.5	2.0
47	0.01	0.138	0.13	A	A	VERO	0.126	0.021	0.104	0.200	0.083	0.200	-	1.5	2.0
48	0.01	0.138	0.17	A	A	VERO	0.126	0.010	0.115	0.201	0.036	0.201	-	1.5	3.4
49	0.01	0.138	0.1	A	A	VERO	0.159	0.042	0.117	0.240	0.147	0.239	-	1.4	1.7
50	0.01	0.138	0.15	A	A	VERO	0.156	0.028	0.127	0.240	0.097	0.239	-	1.4	2.2
51	0.01	0.138	0.2	A	A	VERO	0.157	0.016	0.141	0.245	0.056	0.250	-	1.4	2.8
52	0.01	0.138	0.1	A	A	VERO	0.182	0.052	0.131	0.273	0.180	0.276	-	1.4	1.6
53	0.01	0.138	0.16	A	A	VERO	0.182	0.036	0.146	0.273	0.118	0.278	-	1.4	2.1
54	0.01	0.138	0.22	A	A	VERO	0.182	0.025	0.157	0.288	0.088	0.312	-	1.3	2.2
55	0.01	0.09	0.22	B	A	VERO	0.182	0.011	0.171	0.275	0.061	0.275	0.2105	1.3	2.6
56	0.01	0.09	0.16	B	A	VERO	0.183	0.021	0.161	0.273	0.122	0.277	0.144	1.4	1.8
57	0.01	0.09	0.14	B	A	VERO	0.182	0.024	0.158	0.274	0.142	0.278	0.122	1.4	1.6
58	0.01	0.09	0.12	B	A	VERO	0.123	0.014	0.109	0.197	0.083	0.195	0.105	1.5	2.1
59	0.01	0.09	0.145	B	A	VERO	0.122	0.010	0.112	0.196	0.056	0.196	0.129	1.5	2.6
60	0.01	0.09	0.175	B	A	VERO	0.121	0.004	0.117	0.195	0.024	0.194	0.167	1.5	4.1
61	0.01	0.09	0.13	B	A	VERO	0.154	0.020	0.135	0.238	0.107	0.240	0.114	1.4	2.0
62	0.01	0.09	0.16	B	A	VERO	0.154	0.015	0.139	0.238	0.084	0.241	0.144	1.4	2.1
63	0.01	0.09	0.2	B	A	VERO	0.154	0.008	0.146	0.238	0.044	0.240	0.177	1.4	3.1

Tabella 12.2: Profilo di velocità nella sezione di misura.

	$y=15$	$y=30$	$y=60$	$y=150$
$z=82.8$	2.78	3.09	3.47	3.83
$z=80.8$	2.82	3.13	3.50	3.84
$z=75.8$	2.93	3.22	3.55	3.83
$z=65.8$	3.04	3.35	3.66	3.77
$z=55.8$	3.07	3.43	3.71	3.73
$z=40.8$	3.07	3.45	3.64	3.62
$z=25.8$	3.05	3.37	3.46	3.46
$z=15.8$	3.00	3.18	3.22	3.29
$z=10.8$	2.94	3.05	3.07	3.14
$z=5.8$	2.76	2.80	2.86	2.90
$z=2.8$	2.46	2.58	2.67	2.66
$z=0.8$	2.18	2.18	2.21	2.27

Velocità espressa in [m/s];  $y$  è la distanza dalla parete in sinistra idraulica, in [mm];  $z$  è la distanza dal fondo del canale, in [mm].

Tabella 12.3: Altezze cinetiche nella sezione di misura.

	$y=15$	$y=30$	$y=60$	$y=150$
$z=82.8$	0.394	0.486	0.614	0.747
$z=80.8$	0.406	0.500	0.624	0.751
$z=75.8$	0.439	0.529	0.642	0.747
$z=65.8$	0.471	0.573	0.683	0.725
$z=55.8$	0.481	0.598	0.700	0.710
$z=40.8$	0.482	0.607	0.677	0.669
$z=25.8$	0.474	0.577	0.609	0.609
$z=15.8$	0.458	0.516	0.528	0.552
$z=10.8$	0.442	0.475	0.481	0.503
$z=5.8$	0.388	0.401	0.418	0.429
$z=2.8$	0.308	0.340	0.364	0.360
$z=0.8$	0.243	0.242	0.249	0.264

Altezza cinetica espressa in [m];  $y$  è la distanza dalla parete in sinistra idraulica, in [mm];  $z$  è la distanza dal fondo del canale, in [mm].

# Appendice B: Sperimentazione sul pozzo di caduta

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
1	-	0.059	0.103	0.135	0.0042	0.05	1.5	0	0	-
2	-	0.044	0.089	0.121	0.0023	0.05	1.5	0	0	-
3	-	0.090	0.115	0.127	0.0048	0.05	1.5	0	0	-
4	-	0.126	0.134	0.131	0.0067	0.05	1.5	0	0	-
5	-	0.732	0.738	0.732	0.0082	0.05	1.5	0	0	-
6	-	-	-	-	0.0091	0.05	1.5	0	0	-
7	-	0.898	0.904	0.898	0.0085	0.05	1.5	0	0	-
8	-	0.474	0.480	0.474	0.0077	0.05	1.5	0	0	-
9	-	0.382	0.388	0.382	0.0076	0.05	1.5	0	0	-
10	-	0.346	0.356	0.354	0.0074	0.05	1.5	0	0	-
11	-	0.092	0.119	0.134	0.0033	0.05	1.5	0	0	-
12	-	0.083	0.109	0.123	0.0041	0.05	1.5	0	0	-
13	-	0.504	0.510	0.504	0.0078	0.05	1.5	0	0	-
14	-	0.146	0.183	0.220	0.0139	0.1	1.47	0	0	-
15	-	0.140	0.189	0.238	0.0180	0.1	1.47	0	0	-
16	1	0.090	0.135	0.180	0.0207	0.1	1.47	0	0	transitional
17	1	0.130	0.147	0.163	0.0321	0.1	1.47	0	0	transitional
18	1	0.250	0.260	0.270	0.0375	0.1	1.47	0	0	full
19	1	0.515	0.515	0.515	0.0412	0.1	1.47	0	0	full
20	1	0.960	0.960	0.960	0.0456	0.1	1.47	0	0	full
21	1	0.510	0.510	0.510	0.0428	0.1	1.47	0	0	full
22	1	0.465	0.450	0.435	0.0398	0.1	1.47	0	0	full
23	1	0.167	0.177	0.187	0.0335	0.1	1.47	0	0	transitional
24	1	0.125	0.139	0.153	0.0133	0.1	1.47	0	0	transitional
25	1	0.105	0.132	0.158	0.0152	0.1	1.47	0	0	transitional
26	1	0.083	0.108	0.133	0.0201	0.1	1.47	0	0	transitional
27	1	0.167	0.177	0.187	0.0289	0.1	1.47	0	0	transitional
28	1	0.523	0.523	0.523	0.0416	0.1	1.47	0	0	full
29	1	0.770	0.770	0.770	0.0437	0.1	1.47	0	0	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
30	1	1.110	1.110	1.110	0.0470	0.1	1.47	0	0	full
31	1	0.475	0.475	0.475	0.0408	0.1	1.47	0	0	full
32	1	-	0.158	-	0.0340	0.1	1.47	0	0	-
33	1	0.382	0.382	0.382	0.0427	0.1	1.47	0	0	-
34	1	0.345	0.345	0.345	0.0389	0.1	1.47	0	0	full
35	1	0.250	0.255	0.260	0.0376	0.1	1.47	0	0	full
36	1	0.180	0.190	0.200	0.0367	0.1	1.47	0	0	full
37	1	0.130	0.150	0.170	0.0355	0.1	1.47	0	0	transitional
38	1	0.552	0.552	0.552	0.0413	0.1	1.47	0	0	full
39	1	0.648	0.648	0.648	0.0424	0.1	1.47	0	0	full
40	1	0.360	0.378	0.395	0.0399	0.1	1.47	0	0	full
41	1	0.110	0.135	0.160	0.0246	0.1	1.47	0	0	transitional
42	1	0.110	0.135	0.160	0.0274	0.1	1.47	0	0	transitional
43	1	0.110	0.135	0.160	0.0294	0.1	1.47	0	0	transitional
44	1	0.110	0.135	0.160	0.0183	0.1	1.47	0	0	transitional
45	2	0.531	0.531	0.531	0.0110	0.1	1.5	0.07	1	full
46	2	0.035	0.038	0.040	0.0024	0.1	1.5	0.07	1	weir
47	2	0.038	0.068	0.098	0.0040	0.1	1.5	0.07	1	transitional
48	2	0.120	0.138	0.156	0.0051	0.1	1.5	0.07	1	transitional
49	2	0.145	0.158	0.170	0.0055	0.1	1.5	0.07	1	transitional
50	2	0.170	0.187	0.203	0.0062	0.1	1.5	0.07	1	transitional
51	2	0.180	0.195	0.210	0.0066	0.1	1.5	0.07	1	transitional
52	2	0.248	0.248	0.248	0.0075	0.1	1.5	0.07	1	full
53	2	0.340	0.340	0.340	0.0083	0.1	1.5	0.07	1	full
54	2	0.450	0.450	0.450	0.0094	0.1	1.5	0.07	1	full
55	2	0.568	0.568	0.568	0.0102	0.1	1.5	0.07	1	full
56	2	0.736	0.736	0.736	0.0114	0.1	1.5	0.07	1	full
57	2	0.930	0.930	0.930	0.0126	0.1	1.5	0.07	1	full
58	3	0.020	0.028	0.035	0.0021	0.1	1.5	0.07	2	weir
59	3	0.048	0.048	0.048	0.0030	0.1	1.5	0.07	2	weir
60	3	0.105	0.105	0.105	0.0042	0.1	1.5	0.07	2	weir
61	3	0.048	0.108	0.168	0.0051	0.1	1.5	0.07	2	transitional
62	3	0.160	0.183	0.205	0.0061	0.1	1.5	0.07	2	transitional
63	3	0.160	0.185	0.210	0.0067	0.1	1.5	0.07	2	transitional
64	3	0.232	0.232	0.232	0.0081	0.1	1.5	0.07	2	full
65	3	0.370	0.370	0.370	0.0093	0.1	1.5	0.07	2	full
66	3	0.475	0.475	0.475	0.0101	0.1	1.5	0.07	2	full
67	3	0.602	0.602	0.602	0.0110	0.1	1.5	0.07	2	full
68	3	0.740	0.740	0.740	0.0119	0.1	1.5	0.07	2	full
69	3	0.858	0.858	0.858	0.0126	0.1	1.5	0.07	2	full
70	3	1.152	1.152	1.152	0.0142	0.1	1.5	0.07	2	full
71	4	1.188	1.188	1.188	0.0166	0.1	1.5	0.07	7	full
72	4	0.829	0.829	0.829	0.0150	0.1	1.5	0.07	7	full
73	4	0.593	0.593	0.593	0.0139	0.1	1.5	0.07	7	full
74	4	0.533	0.533	0.533	0.0135	0.1	1.5	0.07	7	full
75	4	0.448	0.448	0.448	0.0131	0.1	1.5	0.07	7	full
76	4	0.325	0.325	0.325	0.0125	0.1	1.5	0.07	7	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
77	4	0.287	0.287	0.287	0.0118	0.1	1.5	0.07	7	full
78	4	0.205	0.205	0.205	0.0113	0.1	1.5	0.07	7	full
79	4	0.080	0.080	0.080	0.0104	0.1	1.5	0.07	7	full
80	4	0.050	0.050	0.050	0.0034	0.1	1.5	0.07	7	weir
81	4	0.020	0.023	0.025	0.0022	0.1	1.5	0.07	7	weir
82	4	0.070	0.070	0.070	0.0037	0.1	1.5	0.07	7	weir
83	4	0.030	0.060	0.090	0.0042	0.1	1.5	0.07	7	transitional
84	4	0.047	0.107	0.167	0.0055	0.1	1.5	0.07	7	transitional
85	4	0.043	0.113	0.183	0.0066	0.1	1.5	0.07	7	transitional
86	5	1.133	1.133	1.133	0.0162	0.1	1.5	0.07	6	full
87	5	0.970	0.970	0.970	0.0154	0.1	1.5	0.07	6	full
88	5	0.800	0.800	0.800	0.0146	0.1	1.5	0.07	6	full
89	5	0.672	0.672	0.672	0.0140	0.1	1.5	0.07	6	full
90	5	0.536	0.536	0.536	0.0132	0.1	1.5	0.07	6	full
91	5	0.420	0.420	0.420	0.0126	0.1	1.5	0.07	6	full
92	5	0.290	0.290	0.290	0.0118	0.1	1.5	0.07	6	full
93	5	0.200	0.200	0.200	0.0111	0.1	1.5	0.07	6	full
94	5	0.022	0.025	0.028	0.0021	0.1	1.5	0.07	6	weir
95	5	0.038	0.040	0.042	0.0030	0.1	1.5	0.07	6	weir
96	5	0.038	0.064	0.090	0.0040	0.1	1.5	0.07	6	transitional
97	5	0.130	0.130	0.130	0.0049	0.1	1.5	0.07	6	transitional
98	5	0.047	0.100	0.153	0.0054	0.1	1.5	0.07	6	transitional
99	5	0.050	0.107	0.163	0.0054	0.1	1.5	0.07	6	transitional
100	5	0.040	0.117	0.194	0.0061	0.1	1.5	0.07	6	transitional
101	5	0.043	0.118	0.193	0.0065	0.1	1.5	0.07	6	transitional
102	5	0.043	0.134	0.225	0.0071	0.1	1.5	0.07	6	transitional
103	5	0.047	0.100	0.153	0.0078	0.1	1.5	0.07	6	transitional
104	5	0.195	0.195	0.195	0.0110	0.1	1.5	0.07	6	full
105	5	0.160	0.160	0.160	0.0108	0.1	1.5	0.07	6	full
106	5	0.125	0.125	0.125	0.0104	0.1	1.5	0.07	6	full
107	5	0.065	0.065	0.065	0.0099	0.1	1.5	0.07	6	full
108	6	1.103	1.103	1.103	0.0158	0.1	1.5	0.07	5	full
109	6	0.810	0.810	0.810	0.0144	0.1	1.5	0.07	5	full
110	6	0.636	0.636	0.636	0.0134	0.1	1.5	0.07	5	full
111	6	0.427	0.427	0.427	0.0122	0.1	1.5	0.07	5	full
112	6	0.145	0.145	0.145	0.0101	0.1	1.5	0.07	5	full
113	6	0.275	0.275	0.275	0.0110	0.1	1.5	0.07	5	full
114	6	0.065	0.065	0.065	0.0094	0.1	1.5	0.07	5	full
115	-	-	0.000	-	0.0000	0.1	1.5	0.07	5	-
116	6	0.040	0.115	0.190	0.0058	0.1	1.5	0.07	5	transitional
117	6	0.052	0.052	0.052	0.0033	0.1	1.5	0.07	5	weir
118	6	0.030	0.030	0.030	0.0016	0.1	1.5	0.07	5	weir
119	6	0.148	0.148	0.148	0.0050	0.1	1.5	0.07	5	transitional
120	6	0.040	0.115	0.190	0.0074	0.1	1.5	0.07	5	transitional
121	6	0.065	0.138	0.210	0.0090	0.1	1.5	0.07	5	transitional
122	6	0.165	0.165	0.165	0.0103	0.1	1.5	0.07	5	full
123	7	0.032	0.032	0.032	0.0021	0.1	1.5	0.07	3	weir

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
124	7	0.040	0.103	0.166	0.0062	0.1	1.5	0.07	3	transitional
125	7	0.111	0.171	0.230	0.0070	0.1	1.5	0.07	3	transitional
126	7	0.128	0.128	0.128	0.0087	0.1	1.5	0.07	3	transitional
127	7	0.325	0.325	0.325	0.0105	0.1	1.5	0.07	3	full
128	7	0.560	0.560	0.560	0.0123	0.1	1.5	0.07	3	full
129	7	0.768	0.768	0.768	0.0135	0.1	1.5	0.07	3	full
130	7	0.910	0.910	0.910	0.0144	0.1	1.5	0.07	3	full
131	8	0.036	0.036	0.036	0.0024	0.1	1.5	0.07	0.45	weir
132	8	0.100	0.100	0.100	0.0048	0.1	1.5	0.07	0.45	full
133	8	0.260	0.260	0.260	0.0072	0.1	1.5	0.07	0.45	full
134	8	0.441	0.441	0.441	0.0090	0.1	1.5	0.07	0.45	full
135	8	0.556	0.556	0.556	0.0100	0.1	1.5	0.07	0.45	full
136	8	0.680	0.680	0.680	0.0109	0.1	1.5	0.07	0.45	full
137	8	0.913	0.913	0.913	0.0124	0.1	1.5	0.07	0.45	full
138	9	0.025	0.027	0.029	0.0022	0.1	1.5	0.05	7	weir
139	9	0.072	0.072	0.072	0.0053	0.1	1.5	0.05	7	weir
140	9	0.045	0.078	0.111	0.0063	0.1	1.5	0.05	7	transitional
141	9	0.075	0.109	0.143	0.0075	0.1	1.5	0.05	7	transitional
142	9	0.050	0.100	0.150	0.0089	0.1	1.5	0.05	7	transitional
143	9	0.110	0.135	0.160	0.0099	0.1	1.5	0.05	7	transitional
144	9	0.115	0.143	0.170	0.0112	0.1	1.5	0.05	7	transitional
145	9	0.120	0.165	0.210	0.0126	0.1	1.5	0.05	7	transitional
146	9	0.130	0.168	0.205	0.0139	0.1	1.5	0.05	7	transitional
147	9	0.150	0.165	0.180	0.0160	0.1	1.5	0.05	7	transitional
148	9	0.160	0.170	0.180	0.0171	0.1	1.5	0.05	7	transitional
149	9	0.150	0.160	0.170	0.0172	0.1	1.5	0.05	7	transitional
150	9	0.420	0.420	0.420	0.0205	0.1	1.5	0.05	7	full
151	9	0.558	0.558	0.558	0.0218	0.1	1.5	0.05	7	full
152	9	0.720	0.720	0.720	0.0232	0.1	1.5	0.05	7	full
153	9	0.916	0.916	0.916	0.0247	0.1	1.5	0.05	7	full
154	9	1.111	1.111	1.111	0.0262	0.1	1.5	0.05	7	full
155	9	0.275	0.278	0.280	0.0190	0.1	1.5	0.05	7	full
156	9	0.140	0.155	0.170	0.0165	0.1	1.5	0.05	7	transitional
157	10	1.113	1.113	1.113	0.0252	0.1	1.5	0.05	5	full
158	10	0.893	0.893	0.893	0.0234	0.1	1.5	0.05	5	full
159	10	0.707	0.707	0.707	0.0217	0.1	1.5	0.05	5	full
160	10	0.478	0.478	0.478	0.0195	0.1	1.5	0.05	5	full
161	10	0.230	0.235	0.240	0.0169	0.1	1.5	0.05	5	full
162	10	0.165	0.170	0.175	0.0158	0.1	1.5	0.05	5	full
163	10	0.150	0.175	0.200	0.0151	0.1	1.5	0.05	5	transitional
164	10	0.140	0.180	0.220	0.0138	0.1	1.5	0.05	5	transitional
165	10	0.150	0.175	0.200	0.0119	0.1	1.5	0.05	5	transitional
166	10	0.060	0.105	0.150	0.0089	0.1	1.5	0.05	5	transitional
167	10	0.085	0.085	0.085	0.0056	0.1	1.5	0.05	5	weir
168	10	0.060	0.060	0.060	0.0037	0.1	1.5	0.05	5	weir
169	11	1.130	1.130	1.130	0.0242	0.1	1.5	0.05	3	full
170	11	0.907	0.907	0.907	0.0225	0.1	1.5	0.05	3	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
171	11	0.695	0.695	0.695	0.0202	0.1	1.5	0.05	3	full
172	11	0.449	0.449	0.449	0.0175	0.1	1.5	0.05	3	full
173	11	0.350	0.355	0.360	0.0164	0.1	1.5	0.05	3	full
174	11	0.215	0.215	0.215	0.0145	0.1	1.5	0.05	3	full
175	11	0.140	0.180	0.220	0.0128	0.1	1.5	0.05	3	transitional
176	11	0.140	0.185	0.230	0.0111	0.1	1.5	0.05	3	transitional
177	11	0.130	0.170	0.210	0.0089	0.1	1.5	0.05	3	transitional
178	11	0.118	0.118	0.118	0.0064	0.1	1.5	0.05	3	weir
179	11	0.086	0.086	0.086	0.0049	0.1	1.5	0.05	3	weir
180	11	0.050	0.050	0.050	0.0031	0.1	1.5	0.05	3	weir
181	12	1.135	1.135	1.135	0.0225	0.1	1.5	0.05	1	full
182	12	0.954	0.954	0.954	0.0209	0.1	1.5	0.05	1	full
183	12	0.798	0.798	0.798	0.0193	0.1	1.5	0.05	1	full
184	12	0.630	0.630	0.630	0.0174	0.1	1.5	0.05	1	full
185	12	0.437	0.437	0.437	0.0150	0.1	1.5	0.05	1	full
186	12	0.325	0.328	0.330	0.0134	0.1	1.5	0.05	1	full
187	12	0.260	0.260	0.260	0.0124	0.1	1.5	0.05	1	full
188	12	0.175	0.175	0.175	0.0108	0.1	1.5	0.05	1	transitional
189	12	0.120	0.140	0.160	0.0080	0.1	1.5	0.05	1	transitional
190	12	0.085	0.088	0.090	0.0049	0.1	1.5	0.05	1	weir
191	12	0.040	0.040	0.040	0.0034	0.1	1.5	0.05	1	weir
192	13	1.130	1.130	1.130	0.0185	0.1	1.5	0.05	0.33	full
193	13	0.904	0.904	0.904	0.0166	0.1	1.5	0.05	0.33	full
194	13	0.675	0.675	0.675	0.0144	0.1	1.5	0.05	0.33	full
195	13	0.460	0.460	0.460	0.0119	0.1	1.5	0.05	0.33	full
196	13	0.270	0.270	0.270	0.0094	0.1	1.5	0.05	0.33	full
197	13	0.171	0.171	0.171	0.0075	0.1	1.5	0.05	0.33	full
198	13	0.090	0.093	0.095	0.0050	0.1	1.5	0.05	0.33	weir
199	13	0.030	0.040	0.050	0.0031	0.1	1.5	0.05	0.33	weir
200	14	0.996	0.996	0.996	0.0306	0.1	1.5	0.03	6	full
201	14	0.778	0.778	0.778	0.0283	0.1	1.5	0.03	6	full
202	14	0.638	0.638	0.638	0.0266	0.1	1.5	0.03	6	full
203	14	0.462	0.466	0.469	0.0247	0.1	1.5	0.03	6	full
204	14	0.242	0.242	0.242	0.0224	0.1	1.5	0.03	6	full
205	14	0.180	0.180	0.180	0.0213	0.1	1.5	0.03	6	full
206	14	0.170	0.235	0.300	0.0202	0.1	1.5	0.03	6	transitional
207	14	0.160	0.220	0.280	0.0191	0.1	1.5	0.03	6	transitional
208	14	0.150	0.185	0.220	0.0166	0.1	1.5	0.03	6	transitional
209	14	0.130	0.155	0.180	0.0138	0.1	1.5	0.03	6	transitional
210	14	0.095	0.095	0.095	0.0074	0.1	1.5	0.03	6	weir
211	14	0.088	0.088	0.088	0.0043	0.1	1.5	0.03	6	weir
212	14	0.170	0.220	0.270	0.0209	0.1	1.5	0.03	6	transitional
213	15	1.074	1.074	1.074	0.0309	0.1	1.5	0.03	4	full
214	15	0.900	0.900	0.900	0.0293	0.1	1.5	0.03	4	full
215	15	0.780	0.780	0.780	0.0279	0.1	1.5	0.03	4	full
216	15	0.644	0.644	0.644	0.0262	0.1	1.5	0.03	4	full
217	15	0.440	0.440	0.440	0.0236	0.1	1.5	0.03	4	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
218	15	0.260	0.265	0.270	0.0212	0.1	1.5	0.03	4	full
219	15	0.180	0.195	0.210	0.0195	0.1	1.5	0.03	4	transitional
220	15	0.170	0.220	0.270	0.0184	0.1	1.5	0.03	4	transitional
221	15	0.140	0.180	0.220	0.0158	0.1	1.5	0.03	4	transitional
222	15	0.120	0.180	0.240	0.0127	0.1	1.5	0.03	4	transitional
223	15	0.090	0.115	0.140	0.0090	0.1	1.5	0.03	4	transitional
224	15	0.090	0.090	0.090	0.0048	0.1	1.5	0.03	4	weir
225	15	0.020	0.030	0.040	0.0026	0.1	1.5	0.03	4	weir
226	16	0.095	0.095	0.095	0.0056	0.1	1.5	0.03	2	weir
227	16	0.055	0.105	0.155	0.0089	0.1	1.5	0.03	2	transitional
228	16	0.110	0.168	0.225	0.0117	0.1	1.5	0.03	2	transitional
229	16	0.150	0.202	0.254	0.0140	0.1	1.5	0.03	2	transitional
230	16	0.190	0.215	0.240	0.0168	0.1	1.5	0.03	2	transitional
231	16	1.015	1.015	1.015	0.0285	0.1	1.5	0.03	2	full
232	16	0.872	0.872	0.872	0.0269	0.1	1.5	0.03	2	full
233	16	0.686	0.686	0.686	0.0247	0.1	1.5	0.03	2	full
234	16	0.516	0.516	0.516	0.0224	0.1	1.5	0.03	2	full
235	16	0.310	0.315	0.320	0.0194	0.1	1.5	0.03	2	full
236	16	0.215	0.218	0.220	0.0172	0.1	1.5	0.03	2	full
237	16	0.040	0.040	0.040	0.0030	0.1	1.5	0.03	2	weir
238	17	0.095	0.095	0.095	0.0048	0.1	1.5	0.03	0.48	weir
239	17	0.150	0.168	0.185	0.0107	0.1	1.5	0.03	0.48	transitional
240	17	0.180	0.200	0.220	0.0134	0.1	1.5	0.03	0.48	transitional
241	17	0.300	0.300	0.300	0.0164	0.1	1.5	0.03	0.48	full
242	17	0.460	0.460	0.460	0.0199	0.1	1.5	0.03	0.48	full
243	17	0.635	0.635	0.635	0.0221	0.1	1.5	0.03	0.48	full
244	17	0.760	0.760	0.760	0.0238	0.1	1.5	0.03	0.48	full
245	17	1.029	1.029	1.029	0.0270	0.1	1.5	0.03	0.48	full
246	17	0.418	0.418	0.418	0.0187	0.1	1.5	0.03	0.48	full
247	17	0.125	0.125	0.125	0.0081	0.1	1.5	0.03	0.48	transitional
248	17	0.020	0.029	0.038	0.0022	0.1	1.5	0.03	0.48	weir
249	18	0.477	0.477	0.477	0.0133	0.1	1	0.07	7	full
250	18	1.098	1.098	1.098	0.0163	0.1	1	0.07	7	full
251	18	0.956	0.956	0.956	0.0157	0.1	1	0.07	7	full
252	18	0.740	0.740	0.740	0.0147	0.1	1	0.07	7	full
253	18	0.560	0.560	0.560	0.0138	0.1	1	0.07	7	full
254	18	0.301	0.301	0.301	0.0125	0.1	1	0.07	7	full
255	18	0.172	0.172	0.172	0.0112	0.1	1	0.07	7	full
256	18	0.080	0.085	0.090	0.0103	0.1	1	0.07	7	full
257	18	0.050	0.145	0.240	0.0086	0.1	1	0.07	7	transitional
258	18	0.047	0.130	0.213	0.0068	0.1	1	0.07	7	transitional
259	18	0.098	0.098	0.098	0.0041	0.1	1	0.07	7	weir
260	18	0.052	0.052	0.052	0.0031	0.1	1	0.07	7	weir
261	18	0.050	0.118	0.185	0.0056	0.1	1	0.07	7	transitional
262	18	0.050	0.135	0.220	0.0092	0.1	1	0.07	7	transitional
263	18	0.150	0.215	0.280	0.0106	0.1	1	0.07	7	transitional
264	19	1.122	1.122	1.122	0.0160	0.1	1	0.07	4	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
265	19	0.903	0.903	0.903	0.0148	0.1	1	0.07	4	full
266	19	0.643	0.643	0.643	0.0133	0.1	1	0.07	4	full
267	19	0.417	0.417	0.417	0.0119	0.1	1	0.07	4	full
268	19	0.175	0.175	0.175	0.0100	0.1	1	0.07	4	full
269	19	0.060	0.135	0.210	0.0087	0.1	1	0.07	4	transitional
270	19	0.060	0.115	0.170	0.0066	0.1	1	0.07	4	transitional
271	19	0.103	0.103	0.103	0.0044	0.1	1	0.07	4	weir
272	19	0.030	0.030	0.030	0.0019	0.1	1	0.07	4	weir
273	19	0.250	0.250	0.250	0.0105	0.1	1	0.07	4	full
274	20	0.411	0.411	0.411	0.0105	0.1	1	0.07	2	full
275	20	1.082	1.082	1.082	0.0153	0.1	1	0.07	2	full
276	20	0.932	0.932	0.932	0.0143	0.1	1	0.07	2	full
277	20	0.759	0.759	0.759	0.0132	0.1	1	0.07	2	full
278	20	0.588	0.588	0.588	0.0120	0.1	1	0.07	2	full
279	20	0.421	0.421	0.421	0.0107	0.1	1	0.07	2	full
280	20	0.255	0.255	0.255	0.0093	0.1	1	0.07	2	full
281	20	0.090	0.090	0.090	0.0073	0.1	1	0.07	2	full
282	20	0.065	0.103	0.140	0.0050	0.1	1	0.07	2	transitional
283	20	0.068	0.068	0.068	0.0032	0.1	1	0.07	2	weir
284	20	0.040	0.040	0.040	0.0074	0.1	1	0.07	2	full
285	20	0.130	0.153	0.177	0.0058	0.1	1	0.07	2	transitional
286	20	0.130	0.168	0.205	0.0077	0.1	1	0.07	2	transitional
287	20	0.305	0.305	0.305	0.0097	0.1	1	0.07	2	full
288	21	0.670	0.670	0.670	0.0099	0.1	1	0.07	0.45	weir
289	21	0.435	0.435	0.435	0.0080	0.1	1	0.07	0.45	weir
290	21	0.196	0.196	0.196	0.0056	0.1	1	0.07	0.45	weir
291	21	0.100	0.100	0.100	0.0041	0.1	1	0.07	0.45	weir
292	21	0.050	0.050	0.050	0.0028	0.1	1	0.07	0.45	weir
293	21	1.132	1.132	1.132	0.0142	0.1	1	0.07	0.45	full
294	21	1.025	1.018	1.010	0.0133	0.1	1	0.07	0.45	weir
295	21	0.890	0.880	0.870	0.0123	0.1	1	0.07	0.45	weir
296	21	0.770	0.763	0.755	0.0110	0.1	1	0.07	0.45	weir
297	22	1.078	1.078	1.078	0.0258	0.1	1	0.05	7	full
298	22	0.872	0.872	0.872	0.0242	0.1	1	0.05	7	full
299	22	0.628	0.628	0.628	0.0222	0.1	1	0.05	7	full
300	22	0.392	0.392	0.392	0.0201	0.1	1	0.05	7	full
301	22	0.240	0.203	0.165	0.0174	0.1	1	0.05	7	transitional
302	22	0.240	0.170	0.100	0.0149	0.1	1	0.05	7	transitional
303	22	0.210	0.155	0.100	0.0117	0.1	1	0.05	7	transitional
304	22	0.115	0.115	0.115	0.0062	0.1	1	0.05	7	weir
305	22	0.200	0.150	0.100	0.0135	0.1	1	0.05	7	transitional
306	22	0.160	0.170	0.180	0.0167	0.1	1	0.05	7	transitional
307	22	0.290	0.290	0.290	0.0190	0.1	1	0.05	7	full
308	23	1.075	1.075	1.075	0.0242	0.1	1	0.05	4	full
309	23	0.870	0.870	0.870	0.0224	0.1	1	0.05	4	full
310	23	0.648	0.648	0.648	0.0203	0.1	1	0.05	4	full
311	23	0.413	0.413	0.413	0.0179	0.1	1	0.05	4	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
312	23	0.185	0.185	0.185	0.0152	0.1	1	0.05	4	transitional
313	23	0.140	0.180	0.220	0.0121	0.1	1	0.05	4	transitional
314	23	0.150	0.150	0.150	0.0071	0.1	1	0.05	4	weir
315	23	0.155	0.170	0.185	0.0104	0.1	1	0.05	4	transitional
316	23	0.150	0.195	0.240	0.0137	0.1	1	0.05	4	transitional
317	23	0.352	0.352	0.352	0.0171	0.1	1	0.05	4	full
318	24	1.078	1.078	1.078	0.0224	0.1	1	0.05	2	full
319	24	0.841	0.841	0.841	0.0208	0.1	1	0.05	2	full
320	24	0.620	0.620	0.620	0.0184	0.1	1	0.05	2	full
321	24	0.420	0.420	0.420	0.0160	0.1	1	0.05	2	full
322	24	0.195	0.195	0.195	0.0128	0.1	1	0.05	2	transitional
323	24	0.130	0.155	0.180	0.0087	0.1	1	0.05	2	transitional
324	24	0.090	0.090	0.090	0.0051	0.1	1	0.05	2	weir
325	24	0.140	0.190	0.240	0.0110	0.1	1	0.05	2	transitional
326	24	0.305	0.305	0.305	0.0144	0.1	1	0.05	2	full
327	25	1.180	1.180	1.180	0.0220	0.1	1	0.05	0.26	full
328	25	0.960	0.960	0.960	0.0199	0.1	1	0.05	0.26	full
329	25	0.726	0.726	0.726	0.0175	0.1	1	0.05	0.26	full
330	25	0.485	0.485	0.485	0.0147	0.1	1	0.05	0.26	full
331	25	0.255	0.255	0.255	0.0112	0.1	1	0.05	0.26	full
332	25	0.110	0.110	0.110	0.0061	0.1	1	0.05	0.26	weir
333	25	0.272	0.272	0.272	0.0099	0.1	1	0.05	0.26	full
334	25	0.080	0.080	0.080	0.0044	0.1	1	0.05	0.26	weir
335	25	0.082	0.082	0.082	0.0043	0.1	1	0.05	0.26	weir
336	25	0.080	0.080	0.080	0.0043	0.1	1	0.05	0.26	weir
337	25	0.140	0.190	0.240	0.0133	0.1	1	0.05	0.26	transitional
338	22	0.130	0.175	0.220	0.0114	0.1	1	0.05	7	transitional
339	22	0.050	0.135	0.220	0.0096	0.1	1	0.05	7	transitional
340	22	0.025	0.033	0.040	0.0028	0.1	1	0.05	7	weir
341	25	0.168	0.168	0.168	0.0093	0.1	1	0.05	0.26	weir
342	26	1.120	1.120	1.120	0.0313	0.1	1	0.03	6	full
343	26	0.825	0.825	0.825	0.0284	0.1	1	0.03	6	full
344	26	0.615	0.615	0.615	0.0261	0.1	1	0.03	6	full
345	26	0.370	0.375	0.380	0.0232	0.1	1	0.03	6	full
346	26	0.160	0.225	0.290	0.0195	0.1	1	0.03	6	transitional
347	26	0.140	0.200	0.260	0.0160	0.1	1	0.03	6	transitional
348	26	0.080	0.130	0.180	0.0117	0.1	1	0.03	6	transitional
349	26	0.050	0.085	0.120	0.0081	0.1	1	0.03	6	transitional
350	26	0.060	0.060	0.060	0.0050	0.1	1	0.03	6	weir
351	27	1.091	1.091	1.091	0.0301	0.1	1	0.03	4	full
352	27	0.885	0.885	0.885	0.0279	0.1	1	0.03	4	full
353	27	0.627	0.627	0.627	0.0248	0.1	1	0.03	4	full
354	27	0.440	0.440	0.440	0.0223	0.1	1	0.03	4	full
355	27	0.220	0.225	0.230	0.0191	0.1	1	0.03	4	full
356	27	0.070	0.115	0.160	0.0156	0.1	1	0.03	4	transitional
357	27	0.080	0.120	0.160	0.0122	0.1	1	0.03	4	transitional
358	27	0.060	0.103	0.145	0.0087	0.1	1	0.03	4	transitional

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
359	27	0.060	0.065	0.070	0.0045	0.1	1	0.03	4	weir
360	28	1.167	1.167	1.167	0.0296	0.1	1	0.03	2	full
361	28	0.922	0.922	0.922	0.0270	0.1	1	0.03	2	full
362	28	0.730	0.730	0.730	0.0247	0.1	1	0.03	2	full
363	28	0.481	0.481	0.481	0.0215	0.1	1	0.03	2	full
364	28	0.210	0.210	0.210	0.0170	0.1	1	0.03	2	transitional
365	28	0.170	0.205	0.240	0.0136	0.1	1	0.03	2	transitional
366	28	0.135	0.163	0.190	0.0103	0.1	1	0.03	2	transitional
367	28	0.050	0.070	0.090	0.0067	0.1	1	0.03	2	transitional
368	28	0.060	0.065	0.070	0.0040	0.1	1	0.03	2	weir
369	29	1.119	1.119	1.119	0.0276	0.1	1	0.03	0.32	full
370	29	0.873	0.873	0.873	0.0247	0.1	1	0.03	0.32	full
371	29	0.635	0.635	0.635	0.0215	0.1	1	0.03	0.32	full
372	29	0.415	0.420	0.425	0.0179	0.1	1	0.03	0.32	full
373	29	0.245	0.258	0.270	0.0141	0.1	1	0.03	0.32	full
374	29	0.160	0.193	0.225	0.0133	0.1	1	0.03	0.32	transitional
375	29	0.155	0.158	0.160	0.0091	0.1	1	0.03	0.32	weir
376	29	0.090	0.095	0.100	0.0067	0.1	1	0.03	0.32	weir
377	29	0.060	0.063	0.065	0.0038	0.1	1	0.03	0.32	weir
378	30	1.060	1.060	1.060	0.0427	0.1	1	0	0	full
379	30	0.820	0.820	0.820	0.0401	0.1	1	0	0	full
380	30	0.540	0.540	0.540	0.0369	0.1	1	0	0	full
381	30	0.305	0.308	0.310	0.0340	0.1	1	0	0	full
382	30	0.140	0.160	0.180	0.0289	0.1	1	0	0	transitional
383	30	0.110	0.195	0.280	0.0240	0.1	1	0	0	transitional
384	30	0.130	0.200	0.270	0.0202	0.1	1	0	0	transitional
385	30	0.120	0.160	0.200	0.0162	0.1	1	0	0	transitional
386	30	0.100	0.120	0.140	0.0122	0.1	1	0	0	transitional
387	30	0.070	0.080	0.090	0.0071	0.1	1	0	0	weir
388	30	0.030	0.038	0.045	0.0036	0.1	1	0	0	weir
389	30	0.180	0.230	0.280	0.0253	0.1	1	0	0	transitional
390	30	0.120	0.145	0.170	0.0274	0.1	1	0	0	transitional
391	23	0.120	0.123	0.125	0.0064	0.1	1	0.05	4	weir
392	23	0.045	0.048	0.050	0.0027	0.1	1	0.05	4	weir
393	63	1.130	1.130	1.130	0.0304	0.1	0	0	0	libero
394	63	0.983	0.983	0.983	0.0285	0.1	0	0	0	libero
395	63	0.798	0.798	0.798	0.0257	0.1	0	0	0	libero
396	63	0.599	0.599	0.599	0.0224	0.1	0	0	0	libero
397	63	0.384	0.384	0.384	0.0181	0.1	0	0	0	libero
398	63	0.267	0.267	0.267	0.0152	0.1	0	0	0	libero
399	64	1.000	1.000	1.000	0.0119	0.1	0.5	0.07	5	weir
400	64	0.797	0.797	0.797	0.0107	0.1	0.5	0.07	5	weir
401	64	0.640	0.640	0.640	0.0097	0.1	0.5	0.07	5	weir
402	64	0.480	0.480	0.480	0.0085	0.1	0.5	0.07	5	weir
403	64	0.303	0.303	0.303	0.0069	0.1	0.5	0.07	5	weir
404	64	0.160	0.160	0.160	0.0052	0.1	0.5	0.07	5	weir
405	64	0.085	0.085	0.085	0.0036	0.1	0.5	0.07	5	weir

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
406	64	0.036	0.036	0.036	0.0019	0.1	0.5	0.07	5	weir
407	31	0.962	0.962	0.962	0.0145	0.1	0.5	0.07	2	full
408	31	0.790	0.790	0.790	0.0134	0.1	0.5	0.07	2	full
409	31	0.574	0.574	0.574	0.0119	0.1	0.5	0.07	2	full
410	31	0.377	0.377	0.377	0.0104	0.1	0.5	0.07	2	full
411	31	0.210	0.210	0.210	0.0088	0.1	0.5	0.07	2	full
412	31	0.085	0.085	0.085	0.0071	0.1	0.5	0.07	2	full
413	31	0.060	0.100	0.140	0.0051	0.1	0.5	0.07	2	transitional
414	31	0.074	0.074	0.074	0.0025	0.1	0.5	0.07	2	weir
415	31	0.045	0.045	0.045	0.0022	0.1	0.5	0.07	2	weir
416	31	0.130	0.160	0.190	0.0066	0.1	0.5	0.07	2	transitional
417	65	0.931	0.931	0.931	0.0130	0.1	0.5	0.07	0	weir
418	65	0.781	0.781	0.781	0.0120	0.1	0.5	0.07	0	weir
419	65	0.649	0.649	0.649	0.0110	0.1	0.5	0.07	0	weir
420	65	0.472	0.472	0.472	0.0096	0.1	0.5	0.07	0	weir
421	65	0.301	0.301	0.301	0.0079	0.1	0.5	0.07	0	weir
422	65	0.200	0.200	0.200	0.0055	0.1	0.5	0.07	0	weir
423	65	0.080	0.080	0.080	0.0030	0.1	0.5	0.07	0	weir
424	65	0.038	0.038	0.038	0.0016	0.1	0.5	0.07	0	weir
425	32	0.989	0.989	0.989	0.0245	0.1	0.5	0.05	5	full
426	32	0.790	0.790	0.790	0.0224	0.1	0.5	0.05	5	full
427	32	0.463	0.463	0.463	0.0195	0.1	0.5	0.05	5	full
428	32	0.180	0.210	0.240	0.0163	0.1	0.5	0.05	5	transitional
429	32	0.120	0.260	0.400	0.0136	0.1	0.5	0.05	5	transitional
430	32	0.090	0.155	0.220	0.0090	0.1	0.5	0.05	5	transitional
431	32	0.075	0.075	0.075	0.0047	0.1	0.5	0.05	5	weir
432	32	0.061	0.061	0.061	0.0030	0.1	0.5	0.05	5	weir
433	33	0.996	0.996	0.996	0.0223	0.1	0.5	0.05	2	full
434	33	0.771	0.771	0.771	0.0201	0.1	0.5	0.05	2	full
435	33	0.567	0.567	0.567	0.0178	0.1	0.5	0.05	2	full
436	33	0.330	0.330	0.330	0.0149	0.1	0.5	0.05	2	full
437	33	0.170	0.220	0.270	0.0123	0.1	0.5	0.05	2	transitional
438	33	0.130	0.155	0.180	0.0092	0.1	0.5	0.05	2	transitional
439	33	0.080	0.085	0.090	0.0039	0.1	0.5	0.05	2	weir
440	33	0.040	0.043	0.045	0.0020	0.1	0.5	0.05	2	weir
441	34	0.980	0.980	0.980	0.0201	0.1	0.5	0.05	0.39	full
442	34	0.729	0.729	0.729	0.0176	0.1	0.5	0.05	0.39	full
443	34	0.486	0.486	0.486	0.0147	0.1	0.5	0.05	0.39	full
444	34	0.330	0.400	0.470	0.0123	0.1	0.5	0.05	0.39	transitional
445	34	0.160	0.213	0.265	0.0091	0.1	0.5	0.05	0.39	transitional
446	34	0.085	0.088	0.090	0.0043	0.1	0.5	0.05	0.39	weir
447	34	0.045	0.045	0.045	0.0020	0.1	0.5	0.05	0.39	weir
448	35	0.962	0.962	0.962	0.0295	0.1	0.5	0.03	5	full
449	35	0.795	0.795	0.795	0.0278	0.1	0.5	0.03	5	full
450	35	0.635	0.635	0.635	0.0260	0.1	0.5	0.03	5	full
451	35	0.478	0.478	0.478	0.0241	0.1	0.5	0.03	5	full
452	35	0.340	0.340	0.340	0.0222	0.1	0.5	0.03	5	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
453	35	0.170	0.225	0.280	0.0200	0.1	0.5	0.03	5	transitional
454	35	0.150	0.250	0.350	0.0177	0.1	0.5	0.03	5	transitional
455	35	0.130	0.190	0.250	0.0148	0.1	0.5	0.03	5	transitional
456	35	0.120	0.160	0.200	0.0088	0.1	0.5	0.03	5	transitional
457	35	0.090	0.090	0.090	0.0061	0.1	0.5	0.03	5	weir
458	35	0.050	0.053	0.055	0.0020	0.1	0.5	0.03	5	weir
459	36	0.960	0.960	0.960	0.0272	0.1	0.5	0.03	2.1	full
460	36	0.803	0.803	0.803	0.0253	0.1	0.5	0.03	2.1	full
461	36	0.645	0.645	0.645	0.0233	0.1	0.5	0.03	2.1	full
462	36	0.470	0.470	0.470	0.0208	0.1	0.5	0.03	2.1	full
463	36	0.315	0.315	0.315	0.0182	0.1	0.5	0.03	2.1	full
464	36	0.180	0.190	0.200	0.0158	0.1	0.5	0.03	2.1	transitional
465	36	0.160	0.210	0.260	0.0136	0.1	0.5	0.03	2.1	transitional
466	36	0.130	0.165	0.200	0.0109	0.1	0.5	0.03	2.1	transitional
467	36	0.100	0.100	0.100	0.0070	0.1	0.5	0.03	2.1	weir
468	36	0.060	0.063	0.065	0.0026	0.1	0.5	0.03	2.1	weir
469	37	0.827	0.827	0.827	0.0235	0.1	0.5	0.03	0.4	full
470	37	0.720	0.720	0.720	0.0212	0.1	0.5	0.03	0.4	full
471	37	0.504	0.504	0.504	0.0189	0.1	0.5	0.03	0.4	full
472	37	0.386	0.386	0.386	0.0162	0.1	0.5	0.03	0.4	full
473	37	0.190	0.225	0.260	0.0129	0.1	0.5	0.03	0.4	transitional
474	37	0.150	0.180	0.210	0.0103	0.1	0.5	0.03	0.4	transitional
475	37	0.095	0.098	0.100	0.0051	0.1	0.5	0.03	0.4	weir
476	37	0.060	0.060	0.060	0.0022	0.1	0.5	0.03	0.4	weir
477	38	0.980	0.980	0.980	0.0376	0.1	0.5	0	0	full
478	38	0.780	0.780	0.780	0.0350	0.1	0.5	0	0	full
479	38	0.630	0.630	0.630	0.0328	0.1	0.5	0	0	full
480	38	0.490	0.490	0.490	0.0306	0.1	0.5	0	0	full
481	38	0.330	0.510	0.690	0.0282	0.1	0.5	0	0	transitional
482	38	0.210	0.210	0.210	0.0258	0.1	0.5	0	0	full
483	38	0.160	0.215	0.270	0.0234	0.1	0.5	0	0	transitional
484	38	0.170	0.240	0.310	0.0211	0.1	0.5	0	0	transitional
485	38	0.130	0.210	0.290	0.0182	0.1	0.5	0	0	transitional
486	38	0.130	0.190	0.250	0.0148	0.1	0.5	0	0	transitional
487	38	0.120	0.130	0.140	0.0102	0.1	0.5	0	0	weir
488	38	0.100	0.108	0.115	0.0078	0.1	0.5	0	0	weir
489	38	0.050	0.053	0.055	0.0020	0.1	0.5	0	0	weir
490	39	1.055	1.055	1.055	0.0348	0.1	0.2	0	0	full
491	39	0.879	0.879	0.879	0.0323	0.1	0.2	0	0	full
492	39	0.700	0.700	0.700	0.0295	0.1	0.2	0	0	full
493	39	0.490	0.490	0.490	0.0260	0.1	0.2	0	0	full
494 (a)	39	0.340	0.340	0.340	0.0227	0.1	0.2	0	0	full
494 (b)	39	0.940	0.940	0.940	0.0227	0.1	0.2	0	0	Borda
495 (a)	39	0.200	0.200	0.200	0.0193	0.1	0.2	0	0	full
495 (b)	39	0.675	0.675	0.675	0.0193	0.1	0.2	0	0	Borda
496 (a)	39	0.170	0.170	0.170	0.0157	0.1	0.2	0	0	full
496 (b)	39	0.440	0.440	0.440	0.0157	0.1	0.2	0	0	Borda

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
497	39	0.265	0.265	0.265	0.0124	0.1	0.2	0	0	Borda
498	39	0.110	0.120	0.130	0.0088	0.1	0.2	0	0	Borda
499	39	0.085	0.085	0.085	0.0034	0.1	0.2	0	0	Borda
500	66	0.903	0.903	0.903	0.0222	0.1	0.1	0	0	Borda
501	66	0.680	0.680	0.680	0.0194	0.1	0.1	0	0	Borda
502	66	0.455	0.455	0.455	0.0162	0.1	0.1	0	0	Borda
503	66	0.210	0.210	0.210	0.0111	0.1	0.1	0	0	Borda
504	66	0.120	0.120	0.120	0.0081	0.1	0.1	0	0	Borda
505	66	0.090	0.093	0.095	0.0040	0.1	0.1	0	0	Borda
506	40	0.944	0.944	0.944	0.0219	0.07	1.45	0	0	full
507	40	0.574	0.574	0.574	0.0202	0.07	1.45	0	0	full
508	40	0.239	0.239	0.239	0.0187	0.07	1.45	0	0	full
509	40	0.124	0.134	0.144	0.0165	0.07	1.45	0	0	full
510	40	0.114	0.124	0.134	0.0145	0.07	1.45	0	0	transitional
511	40	0.114	0.149	0.184	0.0104	0.07	1.45	0	0	transitional
512	40	0.124	0.139	0.154	0.0057	0.07	1.45	0	0	weir
513	40	0.094	0.094	0.094	0.0024	0.07	1.45	0	0	weir
514	40	0.644	0.644	0.644	0.0205	0.07	1.45	0	0	full
515	41	0.720	0.720	0.720	0.0067	0.07	1.45	0.05	10	full
516	41	0.564	0.564	0.564	0.0063	0.07	1.45	0.05	10	full
517	41	0.394	0.394	0.394	0.0059	0.07	1.45	0.05	10	full
518	41	0.104	0.144	0.184	0.0050	0.07	1.45	0.05	10	transitional
519	41	0.094	0.099	0.104	0.0042	0.07	1.45	0.05	10	transitional
520	41	0.074	0.097	0.119	0.0026	0.07	1.45	0.05	10	transitional
521	41	0.009	0.009	0.009	0.0008	0.07	1.45	0.05	10	weir
522	42	0.204	0.204	0.204	0.0052	0.07	1.45	0.05	7	full
523	42	0.144	0.154	0.164	0.0045	0.07	1.45	0.05	7	transitional
524	42	0.084	0.092	0.099	0.0035	0.07	1.45	0.05	7	weir
525	42	0.064	0.069	0.074	0.0019	0.07	1.45	0.05	7	weir
526	42	0.439	0.439	0.439	0.0057	0.07	1.45	0.05	7	full
527	42	0.630	0.630	0.630	0.0063	0.07	1.45	0.05	7	full
528	43	0.744	0.744	0.744	0.0063	0.07	1.45	0.05	3	full
529	43	0.554	0.554	0.554	0.0056	0.07	1.45	0.05	3	full
530	43	0.394	0.394	0.394	0.0050	0.07	1.45	0.05	3	full
531	43	0.187	0.187	0.187	0.0043	0.07	1.45	0.05	3	full
532	43	0.092	0.093	0.094	0.0034	0.07	1.45	0.05	3	transitional
533	43	0.054	0.054	0.054	0.0015	0.07	1.45	0.05	3	weir
534	44	0.104	0.107	0.109	0.0034	0.07	1.45	0.03	3	weir
535	44	0.104	0.114	0.124	0.0050	0.07	1.45	0.03	3	transitional
536	44	0.179	0.179	0.179	0.0068	0.07	1.45	0.03	3	full
537	44	0.360	0.360	0.360	0.0081	0.07	1.45	0.03	3	full
538	44	0.524	0.524	0.524	0.0091	0.07	1.45	0.03	3	full
539	44	0.594	0.594	0.594	0.0095	0.07	1.45	0.03	3	full
540	44	0.724	0.724	0.724	0.0103	0.07	1.45	0.03	3	full
541	44	0.059	0.059	0.059	0.0014	0.07	1.45	0.03	3	weir
542	45	0.055	0.055	0.055	0.0014	0.07	1.45	0.03	6	weir
543	45	0.074	0.079	0.084	0.0026	0.07	1.45	0.03	6	weir

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
544	45	0.104	0.114	0.124	0.0039	0.07	1.45	0.03	6	transitional
545	45	0.099	0.119	0.139	0.0050	0.07	1.45	0.03	6	transitional
546	45	0.134	0.159	0.184	0.0070	0.07	1.45	0.03	6	transitional
547	45	0.166	0.166	0.166	0.0079	0.07	1.45	0.03	6	full
548	45	0.417	0.417	0.417	0.0093	0.07	1.45	0.03	6	full
549	45	0.602	0.602	0.602	0.0103	0.07	1.45	0.03	6	full
550	45	0.782	0.782	0.782	0.0111	0.07	1.45	0.03	6	full
551	46	0.658	0.658	0.658	0.0111	0.07	1.45	0.03	9	full
552	46	0.562	0.562	0.562	0.0108	0.07	1.45	0.03	9	full
553	46	0.424	0.424	0.424	0.0101	0.07	1.45	0.03	9	full
554	46	0.254	0.254	0.254	0.0096	0.07	1.45	0.03	9	full
555	46	0.154	0.179	0.204	0.0085	0.07	1.45	0.03	9	transitional
556	46	0.104	0.119	0.134	0.0068	0.07	1.45	0.03	9	transitional
557	46	0.104	0.119	0.134	0.0056	0.07	1.45	0.03	9	transitional
558	46	0.104	0.104	0.104	0.0036	0.07	1.45	0.03	9	weir
559	46	0.059	0.064	0.069	0.0016	0.07	1.45	0.03	9	weir
560	47	1.007	1.007	1.007	0.0208	0.07	1	0	0	full
561	47	0.792	0.792	0.792	0.0196	0.07	1	0	0	full
562	47	0.604	0.604	0.604	0.0185	0.07	1	0	0	full
563	47	0.319	0.319	0.319	0.0168	0.07	1	0	0	full
564	47	0.164	0.199	0.234	0.0149	0.07	1	0	0	transitional
565	47	0.154	0.179	0.204	0.0127	0.07	1	0	0	transitional
566	47	0.114	0.149	0.184	0.0097	0.07	1	0	0	transitional
567	47	0.104	0.134	0.164	0.0066	0.07	1	0	0	transitional
568	47	0.099	0.099	0.099	0.0027	0.07	1	0	0	weir
569	48	0.996	0.996	0.996	0.0074	0.07	1	0.05	9	full
570	48	0.714	0.714	0.714	0.0068	0.07	1	0.05	9	full
571	48	0.619	0.619	0.619	0.0065	0.07	1	0.05	9	full
572	48	0.389	0.389	0.389	0.0059	0.07	1	0.05	9	full
573	48	0.179	0.179	0.179	0.0054	0.07	1	0.05	9	full
574	48	0.094	0.099	0.104	0.0045	0.07	1	0.05	9	transitional
575	48	0.069	0.082	0.094	0.0034	0.07	1	0.05	9	transitional
576	48	0.014	0.014	0.014	0.0009	0.07	1	0.05	9	weir
577	49	0.064	0.069	0.074	0.0023	0.07	1	0.05	5	weir
578	49	0.074	0.084	0.094	0.0036	0.07	1	0.05	5	transitional
579	49	0.114	0.144	0.174	0.0044	0.07	1	0.05	5	transitional
580	49	0.317	0.317	0.317	0.0051	0.07	1	0.05	5	full
581	49	0.536	0.536	0.536	0.0058	0.07	1	0.05	5	full
582	49	0.624	0.624	0.624	0.0062	0.07	1	0.05	5	full
583	49	0.874	0.874	0.874	0.0069	0.07	1	0.05	5	full
584	50	0.910	0.910	0.910	0.0124	0.07	1	0.03	9	full
585	50	0.774	0.774	0.774	0.0119	0.07	1	0.03	9	full
586	50	0.648	0.648	0.648	0.0113	0.07	1	0.03	9	full
587	50	0.434	0.434	0.434	0.0104	0.07	1	0.03	9	full
588	50	0.154	0.174	0.194	0.0088	0.07	1	0.03	9	transitional
589	50	0.094	0.144	0.194	0.0072	0.07	1	0.03	9	transitional
590	50	0.094	0.104	0.114	0.0047	0.07	1	0.03	9	weir

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
591	50	0.040	0.040	0.040	0.0012	0.07	1	0.03	9	weir
592	51	0.040	0.040	0.040	0.0012	0.07	1	0.03	6	weir
593	51	0.094	0.104	0.114	0.0038	0.07	1	0.03	6	weir
594	51	0.094	0.104	0.114	0.0064	0.07	1	0.03	6	transitional
595	51	0.154	0.174	0.194	0.0079	0.07	1	0.03	6	transitional
596	51	0.344	0.344	0.344	0.0092	0.07	1	0.03	6	full
597	51	0.472	0.472	0.472	0.0098	0.07	1	0.03	6	full
598	51	0.609	0.609	0.609	0.0105	0.07	1	0.03	6	full
599	51	0.738	0.738	0.738	0.0111	0.07	1	0.03	6	full
600	52	0.859	0.859	0.859	0.0111	0.07	1	0.03	3	full
601	52	0.676	0.676	0.676	0.0104	0.07	1	0.03	3	full
602	52	0.594	0.594	0.594	0.0098	0.07	1	0.03	3	full
603	52	0.489	0.489	0.489	0.0090	0.07	1	0.03	3	full
604	52	0.294	0.294	0.294	0.0078	0.07	1	0.03	3	full
605	52	0.144	0.154	0.164	0.0064	0.07	1	0.03	3	transitional
606	52	0.094	0.104	0.114	0.0040	0.07	1	0.03	3	transitional
607	52	0.066	0.066	0.066	0.0017	0.07	1	0.03	3	weir
608	53	1.038	1.038	1.038	0.0184	0.07	0.5	0	0	full
609	53	0.924	0.924	0.924	0.0177	0.07	0.5	0	0	full
610	53	0.780	0.780	0.780	0.0168	0.07	0.5	0	0	full
611	53	0.634	0.634	0.634	0.0158	0.07	0.5	0	0	full
612	53	0.484	0.484	0.484	0.0148	0.07	0.5	0	0	full
613	53	0.299	0.307	0.314	0.0134	0.07	0.5	0	0	full
614	53	0.164	0.179	0.194	0.0120	0.07	0.5	0	0	transitional
615	53	0.144	0.169	0.194	0.0106	0.07	0.5	0	0	transitional
616	53	0.124	0.149	0.174	0.0078	0.07	0.5	0	0	transitional
617	53	0.124	0.139	0.154	0.0055	0.07	0.5	0	0	transitional
618	53	0.094	0.099	0.104	0.0030	0.07	0.5	0	0	weir
619	53	0.069	0.072	0.074	0.0020	0.07	0.5	0	0	weir
620	54	0.064	0.072	0.079	0.0026	0.07	0.5	0.05	7	weir
621	54	0.134	0.184	0.234	0.0047	0.07	0.5	0.05	7	transitional
622	54	0.454	0.454	0.454	0.0059	0.07	0.5	0.05	7	full
623	54	0.739	0.739	0.739	0.0068	0.07	0.5	0.05	7	full
624	54	0.909	0.909	0.909	0.0072	0.07	0.5	0.05	7	full
625	55	0.969	0.969	0.969	0.0071	0.07	0.5	0.05	3	full
626	55	0.752	0.752	0.752	0.0064	0.07	0.5	0.05	3	full
627	55	0.634	0.634	0.634	0.0059	0.07	0.5	0.05	3	full
628	55	0.333	0.333	0.333	0.0050	0.07	0.5	0.05	3	full
629	55	0.154	0.154	0.154	0.0042	0.07	0.5	0.05	3	full
630	55	0.084	0.089	0.094	0.0033	0.07	0.5	0.05	3	transitional
631	55	0.054	0.054	0.054	0.0017	0.07	0.5	0.05	3	weir
632	56	0.054	0.059	0.064	0.0017	0.07	0.5	0.03	6	weir
633	56	0.104	0.109	0.114	0.0040	0.07	0.5	0.03	6	weir
634	56	0.094	0.109	0.124	0.0052	0.07	0.5	0.03	6	transitional
635	56	0.134	0.154	0.174	0.0069	0.07	0.5	0.03	6	transitional
636	56	0.164	0.164	0.164	0.0079	0.07	0.5	0.03	6	transitional
637	56	0.264	0.264	0.264	0.0087	0.07	0.5	0.03	6	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
638	56	0.425	0.425	0.425	0.0096	0.07	0.5	0.03	6	full
639	56	0.550	0.550	0.550	0.0103	0.07	0.5	0.03	6	full
640	56	0.686	0.686	0.686	0.0109	0.07	0.5	0.03	6	full
641	57	1.029	1.029	1.029	0.0121	0.07	0.5	0.03	3	full
642	57	0.933	0.933	0.933	0.0117	0.07	0.5	0.03	3	full
643	57	0.754	0.754	0.754	0.0108	0.07	0.5	0.03	3	full
644	57	0.572	0.572	0.572	0.0098	0.07	0.5	0.03	3	full
645	57	0.413	0.413	0.413	0.0086	0.07	0.5	0.03	3	full
646	57	0.194	0.194	0.194	0.0070	0.07	0.5	0.03	3	full
647	57	0.104	0.129	0.154	0.0052	0.07	0.5	0.03	3	transitional
648	57	0.104	0.109	0.114	0.0039	0.07	0.5	0.03	3	weir
649	57	0.044	0.047	0.049	0.0014	0.07	0.5	0.03	3	weir
650	58	0.854	0.854	0.854	0.0162	0.07	0.21	0	0	full
651	58	0.694	0.694	0.694	0.0148	0.07	0.21	0	0	full
652	58	0.530	0.530	0.530	0.0134	0.07	0.21	0	0	full
653	58	0.395	0.395	0.395	0.0123	0.07	0.21	0	0	full
654	58	0.217	0.217	0.217	0.0104	0.07	0.21	0	0	full
655	58	0.404	0.404	0.404	0.0079	0.07	0.21	0	0	Borda
656	58	0.210	0.210	0.210	0.0059	0.07	0.21	0	0	Borda
657	58	0.104	0.109	0.114	0.0036	0.07	0.21	0	0	Borda
658	58	0.034	0.034	0.034	0.0013	0.07	0.21	0	0	Borda
659	67	1.013	1.013	1.013	0.0119	0.07	0.14	0	0	Borda
660	67	0.734	0.734	0.734	0.0103	0.07	0.14	0	0	Borda
661	67	0.438	0.438	0.438	0.0081	0.07	0.14	0	0	Borda
662	67	0.154	0.154	0.154	0.0051	0.07	0.14	0	0	Borda
663	67	0.102	0.102	0.102	0.0032	0.07	0.14	0	0	Borda
664	67	0.074	0.074	0.074	0.0022	0.07	0.14	0	0	Borda
665	68	0.924	0.924	0.924	0.0132	0.07	0	0	0	libero
666	68	0.715	0.715	0.715	0.0124	0.07	0	0	0	libero
667	68	0.547	0.547	0.547	0.0103	0.07	0	0	0	libero
668	68	0.290	0.290	0.290	0.0078	0.07	0	0	0	libero
669	68	0.148	0.148	0.148	0.0059	0.07	0	0	0	libero
670	68	0.112	0.112	0.112	0.0044	0.07	0	0	0	libero
671	68	0.064	0.064	0.064	0.0021	0.07	0	0	0	libero
672	59	0.714	0.714	0.714	0.0083	0.046	1.45	0	0	full
673	59	0.185	0.185	0.185	0.0073	0.046	1.45	0	0	transitional
674	59	0.139	0.158	0.177	0.0063	0.046	1.45	0	0	transitional
675	59	0.114	0.134	0.154	0.0042	0.046	1.45	0	0	transitional
676	59	0.106	0.106	0.106	0.0020	0.046	1.45	0	0	weir
677	59	0.022	0.022	0.022	0.0010	0.046	1.45	0	0	weir
678	-	0.956	0.956	0.956	0.0089	0.046	1	0	0	-
679	-	0.412	0.412	0.412	0.0084	0.046	1	0	0	-
680	60	0.114	0.134	0.154	0.0033	0.046	1	0	0	transitional
681	60	0.158	0.158	0.158	0.0063	0.046	1	0	0	transitional
682	60	0.102	0.102	0.102	0.0019	0.046	1	0	0	weir
683	60	0.024	0.024	0.024	0.0009	0.046	1	0	0	weir
684	61	0.734	0.734	0.734	0.0069	0.046	0.5	0	0	full

Tabella 12.4: Dati sperimentali

id prova	id config.	$h_{min}$ [m]	$h$ [m]	$h_{max}$ [m]	$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$D$ [m]	$L$ [m]	$d$ [m]	$n$	regime
685	-	0.320	0.320	0.320	0.0054	0.046	0.5	0	0	-
686	61	0.130	0.156	0.181	0.0043	0.046	0.5	0	0	transitional
687	61	0.119	0.132	0.144	0.0032	0.046	0.5	0	0	weir
688	61	0.068	0.068	0.068	0.0012	0.046	0.5	0	0	weir
689	-	0.786	0.786	0.786	0.0074	0.046	0.5	0	0	-
690	62	1.008	1.008	1.008	0.0073	0.046	0.135	0	0	full
691	62	0.494	0.494	0.494	0.0055	0.046	0.135	0	0	full
692	62	0.182	0.182	0.182	0.0028	0.046	0.135	0	0	weir
693	62	0.097	0.097	0.097	0.0016	0.046	0.135	0	0	weir
694	62	0.024	0.024	0.024	0.0008	0.046	0.135	0	0	weir
695	69	0.854	0.854	0.854	0.0050	0.046	0.09	0	0	Borda
696	69	0.556	0.556	0.556	0.0040	0.046	0.09	0	0	Borda
697	69	0.194	0.194	0.194	0.0026	0.046	0.09	0	0	Borda
698	69	0.104	0.104	0.104	0.0018	0.046	0.09	0	0	Borda
699	69	0.039	0.039	0.039	0.0009	0.046	0.09	0	0	Borda
700	70	0.996	0.996	0.996	0.0052	0.046	0	0	0	libero
701	70	0.679	0.679	0.679	0.0042	0.046	0	0	0	libero
702	70	0.382	0.382	0.382	0.0033	0.046	0	0	0	libero
703	70	0.215	0.215	0.215	0.0025	0.046	0	0	0	libero
704	70	0.098	0.098	0.098	0.0017	0.046	0	0	0	libero
705	59	0.942	0.942	0.942	0.0088	0.046	1.45	0	0	full
706	59	0.641	0.641	0.641	0.0082	0.046	1.45	0	0	full
707	59	0.474	0.474	0.474	0.0079	0.046	1.45	0	0	full
708	59	0.333	0.333	0.333	0.0076	0.046	1.45	0	0	full
709	60	1.004	1.004	1.004	0.0086	0.046	1	0	0	full
710	60	0.824	0.824	0.824	0.0081	0.046	1	0	0	full
711	60	0.623	0.623	0.623	0.0077	0.046	1	0	0	full
712	60	0.375	0.375	0.375	0.0071	0.046	1	0	0	full
713	61	0.813	0.813	0.813	0.0073	0.046	0.5	0	0	full
714	61	0.651	0.651	0.651	0.0068	0.046	0.5	0	0	full
715	61	0.460	0.460	0.460	0.0063	0.046	0.5	0	0	full
716	61	0.358	0.358	0.358	0.0059	0.046	0.5	0	0	full
717	61	0.213	0.213	0.213	0.0053	0.046	0.5	0	0	full
718	62	1.114	1.114	1.114	0.0057	0.046	0.135	0	0	Borda
719	62	0.945	0.945	0.945	0.0053	0.046	0.135	0	0	Borda
720	62	0.715	0.715	0.715	0.0046	0.046	0.135	0	0	Borda
721	62	0.516	0.516	0.516	0.0040	0.046	0.135	0	0	Borda
722	62	0.273	0.273	0.273	0.0031	0.046	0.135	0	0	Borda

Tabella 12.5: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.5.

id prova \ z [m]	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1
40	-100	-90	-80		-60		-40	-40
31	-100	-90	-80		-60	-50	-50	-40
19	-76	-94	-51	-40	-44.5	-51.3	-48	-42
38	-100	-90	-80		-60		-50	-40
28	-100	-100	-80		-60	-50	-50	-40
39	-95	-85	-80	-38	-60	-30	-40	-30
21	-101.3	-87.9	-75.2	-72.8		-56.3	-47.7	
29	-100	-100	-80		-60	-50	-50	-30
20	-99	-91	-74.7	-69.5		-54	-46	-40.5
30	-90	-90	-80		-60	-50	-50	-40
71	12.8	13.2	20	25				
72	4.4	6.9	13.5	20				
73	-2	2	9.1	15				
74	-3.9	0.6	7.9	15				
75	-6.2	-0.3	6.2	13				
76	-9.9	-3.7	3.5	5				
77	-6.1	0.3	7.5	10				
78	-8.9	-2	5.4	8				
79	-14.9	-7.7	0.2	5				
86	14.4	17.4	22.5	5				
87	10.8	14	18.9	3				
88	7	11.1	16.3	3				
89	3.9	8.7	14	3				
90	0.6	14	12	3				
91	-2.4	3.4	9.9	0				
92	-5.7	0.7	7.5	0				
93	-8.4	-1.3	5.8	0				
104	-8.8	-2	5.6					
105	-9.6	-2.6	5.1					
108	16.8	18.8	4.2					
109	11	14.1	3.6					
110	7.5	11.4	3.2					
111	2.8	7.6	2.7					
112	-2.5	4.6	2.4					
113	1.2	8.1	3					
122	-3.6	3	1.9					
150	-10.5	-3	5	20				
151	-6.7	0.3	8.3	20				
152	-2.5	4.1	11.9	20				
153	2.2	8.7	15.9	25				
154	6.2	12.9	19.6	30				
155	-13.6	-5.9	2.8	10				
157	16.4	22.9	6.5					
158	12.5	19	3.5					
159	8.7	15.1	2.7					
160	3.5	10.6	2					
161	-2.3	5.2	1.5					

Tabella 12.5: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.5.

id prova \ z [m]	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1
162	-4.2	3.5	3					
169	0.5	-2.6	-1.2					
170	5.4	-2.5	-1.2					
171	4.2	-2.3	-1					
172	3	-1.9	-0.9					
173	2.5	-1.8	-0.7					
174	1.9	-1.3	-0.4					
181	-2.5	-5.3	-4.7					
182	-2.4	-4.8	-4.1					
183	-2.2	-4.5	-3.5					
184	-1.8	-3.5	-2.2					
185	-1.4	-2.4	-1.7					
186	-1.4	-2.3	-1.3					
187	-1.2	-1.7	-0.6					
188	-0.6	-1.3	-0.5					
189	-0.7	-0.8	0					
190	1.2	0	0.9					
192	-4.5	-4.7	-3					
193	-3.5	-3	-2					
194	-1.5	-2.4	-1.5					
195	-1.5	-1.8	-0.5					
196	-1.2	-1.2						
197		-0.5	0.3					
200	8.7	15.9	23.7					
201	5.4	11.8	20.2					
202	2.6	9.5	8					
203	-2.8	4.9	14.4					
204	-9.1	-1.9	7					
205	-22	-11.8	0.3					
213	3.3	-8.4	-14.7	-18				
214	10.2	-8.6	-14.2	-18				
215	8.2	-8.5	-13.3	-14				
216	5.3	-8.2	-12.1	-13				
217	2.8	-7.6	-11.1	-12				
218	-0.7	-7.6	-9.2	-10				
230	-10.2	-7.5	-6.8	-10				
231	-6.5	-20.2	-19.6	-20				
232	-15.6	-19.1	-18.2	-20				
233	-14.6	-17.6	-17.1	-18				
234	-13.5	-15.9	-15.1	-18				
235	-11.5	-13.5	-11.7	-16				
236	-10	-11	-9.5	-15				
241	-7.8	-8	-7.4	-8				
242	-10.9	-12.1	-10.5	-15				
243	-12.9	-14	-12.5	-15				
244	-14	-15.6	-12	-16				
245	-16.2	-18.2	-16.1	-20				

Tabella 12.5: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.5.

id prova \ z [m]	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.9	-1
246	-10.5	-11.1	-9.6	-13				

Tabella 12.6: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.

id prova \ z [m]	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8
249	-17.9	-1.3	-4.8	0.7	2.7	2.5	-2.5	0
250	3.7	8.8	8	15.4	15.2	18	4.4	0
251	-0.7	4.5	8.5	12.4	12.9	16	4	0
252	-8	-2.4	3.8	7.3	9.7	13	3	0
253	-14.3	-8.3	0	3.1	4.7	0.8	3.7	0
254	-22.6	-15.6	-8.3	-2.4	3	7.6	2.9	0
255	-27.8	-20.9	-13.6	-6.9	2	7.1	3.4	0
256	-29.4	-14.1	-16.5	-9.6	-1.6	4.9	2.8	0
264	13	18	22.2	2	1.9	0.3	0.3	-0.8
265	7.7	12.7	18.1	1.4	1.7	0.4	-0.3	0
266	0.9	16.5	13.1	1.5	1.5	0.3	0	0
267	-5.7	0.7	7.9	1.1	1.2	0	0	0
268	-12.4	-5.3	2.9	0.9	1	0	0	0
273	-10.5	-4	3.8	0.7	1	0.5	0	0
274	4.3	1.4	0.6	0				
275	17.2	3.3	0.7	-0.7				
276	15.6	3.3	0.5	-1.2				
277	12	2.9	0.5	-1.1				
278	8.9	2.2	0.3	-0.8				
279	5.1	1.9	0.5	-0.5				
280	1.7	1.3	0.3	-0.5				
287	1.7	1.2	0.6	0				
297	-9.3	0.8	7.5	12.5	12	15.1	4.7	0.4
298	-14	-4.9	2.2	8.2	8.5	12.1	3.9	0
299	-20.5	-11.7	-3.9	3.1	4.9	8.7	3.2	0
300	-28	-18.7	-10.2	-3.2	1.4	5.4	2.7	0
307	-29.5	-31.3	-13.1	-5.6	3.4	9.2	3.8	1
308	6.6	14.1	21.9	3	-0.5	-0.6	-1.3	
309	2.2	9.9	17.8	2.6	-0.4	-0.5	-1.2	
310	-3.9	4.4	12.8	2.2	-0.4	-0.4	-1.1	
311	-9.6	-0.9	7.8	1.8	-0.3	-0.2	-1	
312	-14.8	-6.4	2.8	1.3	0	0	-0.7	
317	-10.5	-1.6	7	1.8	0	0	0	
318	17.1	5.1	-2.2	-3.1	-2	-2.2	1.9	
319	11.8	4.1	-2.2	-2.8	-1.6	-1.4	-2	
320	7.7	2.6	-1.8	-2.2	-1.2	-1.2	-1.8	
321	4.1	2.1	-1.4	-1.9	-0.9	-1.1	-1.5	
322	-2	1	-0.9	-1.2	-0.5	-0.5	-1	
326	0.8	1.5	-1.3	-1.8	-0.5	-0.5	-1	
327	4.5	-1.3	-3.3	-3.9	-1.9	-1.8	-2	

Tabella 12.6: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.

id prova \ z [m]	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8
328	4	-1.2	-2.8	-3.3	-1.6	-1.7	-2	
329	3.4	-1	-2.4	-2.6	-1	-0.9	1.6	
330	9	-0.6	-1.5	-1.8	-0.5	-0.5	1	
331	1	-0.6	-0.8	-1	0	0	0	
333	0.9	-0.5	-1	-1.1	0	0	0	
342	-10.5	6	15	18.2	14.8	6.4	-6.4	-2.5
343	-13.5	-1.2	8	12.1	10.2	5.2	-5.6	-1.4
344	-17.9	-5.8	2.9	8.8	7.4	5.2	-4.1	-1
345	-25.5	-13	-3.2	4.9	8.3	4.7	-2.7	0
351	-1.5	12.5	21.6	-3	-9.8	-9.8	-10.2	-4
352	-4	8	17.8	-3.6	-8.7	-8.5	-9.5	-4.2
353	-7.5	3.2	12.8	-3.2	-6.8	-7	-7.8	-3
354	-12	0	8.6	-1.9	-6.4	-5.2	-5	0
355	-16	-5	4.5	-2.2	-4	-5	-4.5	-1.8
360	7.7	-3.3	-14.4	-16	-14.2	-12.6	-10.8	-3.5
361	4.7	-4	-13.7	-15.4	-13.4	-12.1	-10	-3.5
362	3.7	-4.6	-12.5	-13.7	-11.2	-10.7	-8.9	-3
363	-2.1	-5.5	-10.8	-12	-10.3	-9	-8.2	-3
364	-9	-4.5	-6.8	-7.7	-6.5	-6	-6	-3
369	-0.8	-12.1	-14.4	-15.6	-12.7	-11.2	-9.3	-3
370	-1.7	-10.9	-12.8	-13.5	-10.9	-9	-8.2	-3
371	-2.9	-8.6	-9.5	-11.8	-9.4	-8.4	-7.6	-3
372	-2.7	-8.4	-8.5	-9.3	-8.5	-6.3	-5.8	-3
373	-3	-7	-7	-8	-6	-4	-4	5
378	-101	-70.9	-60.5	-52	-42	-33	-26	-15
379	-96	-70.5	-60.7	-53	-42	-34.2	-26.9	-15.8
380	-91.5	-73	-62.2	-54.5	-44	-35	-27.3	-16
381	-91	-74.2	-62.8	-54.2	-44.1	-36	-27.6	-16.8
477	-55	-29.5	-19	-11.6				
478	-47	-29.2	-18.4	-10.5				
479	-48	-29	-18	-12.2				
480	-45	-29	-18	-12				

Tabella 12.7: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN70.

id prova \ z [m]	-0.07	-0.14	-0.21	-0.28	-0.35	-0.42	-0.49	-0.56
510				-80.5	-80	-55	-70	-75
508	-94.5	-94.1	-90	-84.8	-81.4		-69.7	
509				-81	-82		-71	
507	-82.9	-93.2	-89.8	-68	-58.5	-62.7	-69.5	-77
514	-91.6	-89.8	-86.3	-78.9	-78.4		-67.2	
506	-89.6	-86.4	-82.4	-76.2	-74.5		-63	
522	10.7	3.1	-0.8	-5.6	-8.5	-7.4	0	2.5
523	10	5	1	-4	-7.8	-7	0	
526	0.7	-5	-7.4	-11.7	-13.5	-10.5	0	
527	-5.5	-11.9	-12.9	-16.8	-17.6	-13.2	0	
560	-60.5	-58.2	-52.9	-47.8	-46		-34	
561	-60.8	-59.4	-55.6	-49.1	-47.4		-32.9	
562	-61.8	-61.2	-56.4	-50.6	-48.2		-35.9	
563	-64	-62	-59.1	-52.7	-49.5		-36.8	
612	-31.2	-23.4		-11.8	-7.8			
611	-28.9	-22.2	-13.4	-10.8	-7.4			
610	-29.7	-18.7	-13	-11.1	-7.5			
609	-31.9	-21.3	-12.5	-10.6	-7.4			
608	-28.8	-20.2	-11.2	-9.9	-6.9			

Tabella 12.8: Misure di altezza piezometrica [cm]: DN50.

id prova \ z [m]	-0.092	-0.184	-0.276	-0.368	-0.46	-0.552	-0.644	-0.736
684	-14.2	-13.7	-40	-6.3				
678	-61.5	-51.1	-59.4	-52.9	-48.3	-26.5	-39.2	-38.3
672	-66	-82	-109	-96.5	-75.5	-107	-38	-81.5

Tabella 12.9: Misura della portata d'aria

id configurazione	id prova	$Q_a$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_a/Q$	$q$
4	80	0.00147	0.436	6.86
4	82	0.00319	0.853	7.59
4	83	0.00366	0.874	8.50
4	84	0.00440	0.796	11.22
4	85	0.00528	0.796	13.46
4	79	0.00528	0.505	21.21
4	78	0.00416	0.369	22.90
4	77	0.00483	0.409	23.94
4	76	0.00594	0.475	25.39

Tabella 12.9: Misura della portata d'aria

id configurazione	id prova	$Q_a$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_a/Q$	$q$
4	75	0.00678	0.518	26.57
4	74	0.00711	0.525	27.51
4	73	0.00723	0.520	28.23
4	72	0.00818	0.546	30.40
4	71	0.00980	0.589	33.76
5	94	0.00138	0.668	4.19
5	95	0.00216	0.727	6.04
5	96	0.00399	0.989	8.20
5	97	0.00495	1.011	9.93
5	98	0.00640	1.192	10.90
5	100	0.00514	0.847	12.31
5	101	0.00642	0.982	13.27
5	102	0.00511	0.719	14.43
5	103	0.00642	0.822	15.86
5	107	0.00587	0.593	20.13
5	106	0.00649	0.625	21.11
5	105	0.00559	0.518	21.90
5	104	0.00602	0.545	22.43
5	93	0.00609	0.547	22.58
5	92	0.00606	0.512	24.04
5	91	0.00758	0.604	25.52
5	90	0.00775	0.586	26.87
5	89	0.00961	0.688	28.36
5	88	0.00908	0.620	29.74
5	87	0.01077	0.697	31.37
5	86	0.01096	0.676	32.93
6	118	0.00086	0.527	3.29
6	117	0.00254	0.782	6.60
6	119	0.00547	1.085	10.24
6	116	0.00547	0.939	11.82
6	120	0.00409	0.556	14.93
6	121	0.00583	0.648	18.27
6	112	0.00716	0.707	20.55
6	122	0.00751	0.731	20.86
6	113	0.00678	0.615	22.37
6	111	0.00832	0.681	24.80
6	110	0.00908	0.676	27.27
6	109	0.01022	0.711	29.19
6	108	0.01156	0.730	32.17
7	123	0.00005	0.023	4.20
7	124	0.00637	1.031	12.56
7	125	0.00475	0.681	14.19
7	126	0.00670	0.772	17.65
7	127	0.00868	0.829	21.27
7	128	0.01041	0.844	25.06
7	129	0.01127	0.833	27.48
7	130	0.01265	0.880	29.20
8	131	0.00012	0.049	4.92

Tabella 12.9: Misura della portata d'aria

id configurazione	id prova	$Q_a$ [m <sup>3</sup> /s]	$Q_a/Q$	$q$
8	132	0.00150	0.310	9.81
8	133	0.00725	1.001	14.71
8	134	0.00949	1.052	18.32
8	135	0.01022	1.027	20.23
8	136	0.01127	1.033	22.15
8	137	0.01296	1.042	25.26

# Elenco delle figure

1.1	Schema di funzionamento del bacino fognario gravante su via Tasso a seguito degli interventi. . . . .	2
1.2	Schema di funzionamento del manufatto di partizione (a) e di quello di scarico (b). . . . .	4
2.1	Schema di funzionamento dello sfioratore laterale: pianta (a) e profilo (b). . . . .	11
2.2	Schema di funzionamento dello sfioratore frontale: pianta (a) e profilo (b). . . . .	11
2.3	Funzionamento dello scaricatore a salto per $Q=Q_d$ (a) e per $Q > Q_d$ (b). . . . .	12
2.4	Schema di funzionamento dello scaricatore a luce frontale: pianta (s) e profilo(b). . . . .	13
3.1	Modello del partitore frontale secondo Cozzo (1979) (a) e secondo Mutti e Paoletti (2006) (b). . . . .	18
4.1	Schema e fotografia del partitore semifrontale. . . . .	20
4.2	Il canale a pendenza variabile del Laboratorio di Idraulica del DICEA. . . . .	23
4.3	Il pannello di controllo del canale a pendenza variabile. . . . .	24
4.4	Pianta (a) e profilo (b) del modello fisico del partitore. Tutte le grandezze sono espresse in [mm]; $B_0=300$ mm; $s=8$ mm; $d$ e $B_1$ sono variabili. . . . .	26
4.5	Profilo a spigolo vivo (a) e arrotondato (b) per il setto orizzontale e il setto verticale in sinistra idraulica del partitore. Il setto verticale in destra idraulica è sempre del tipo (a); $s$ è lo spessore del setto, pari a 8 mm. . . . .	27
4.6	Scale di deflusso degli stramazzi impiegati per la taratura del diaframma. . . . .	28

4.7	Scala di deflusso del diaframma per la misura della portata in ingresso. . . . .	28
4.8	Gole venturimetriche. . . . .	29
4.9	Scala di deflusso delle gole venturimetriche per la misura della portata derivata. . . . .	29
4.10	Coordinatometro e idrometro a punta per la misura del livello idrico. . . . .	31
4.11	Tubo di Pitot per la misura della velocità dell'acqua. . . . .	32
4.12	Schema della sezione trasversale (a) e della pianta (b) del partitore semifrontale. . . . .	33
5.1	Condizioni di deflusso all'esterno del manufatto nel caso di vena ben aerata (a) e vena aderente (b). . . . .	35
5.2	Condizioni di deflusso A (a) e B (b) all'interno del manufatto. . . . .	35
5.3	Condizioni di deflusso C (a) e D (b) all'interno del manufatto. . . . .	36
5.4	Condizione di deflusso L all'interno del manufatto. . . . .	36
5.5	Relazione tra i tiranti nel canale immissario, nel derivatore e nell'emissario. . . . .	38
5.6	Confronto tra i valori sperimentali e previsti dall'Eq. (5.5) con i valori dei coefficienti dell'Eq. (5.6) in termini adimensionali (a) e dimensionali (b). . . . .	38
5.7	Confronto tra i valori sperimentali e previsti dall'Eq. (5.8) in termini adimensionali (a) e dimensionali (b). . . . .	39
5.8	Scala di deflusso ricavata a mezzo dell'Eq. (5.9). . . . .	40
5.9	Scala di deflusso del partitore al variare della larghezza $B_1$ . . . . .	41
5.10	Scala di deflusso del partitore al variare della larghezza del manufatto (a), della condizione interna di deflusso (b), del numero di Froude (c) e della pendenza del canale immissario (d). . . . .	42
5.11	Scala di deflusso del partitore secondo l'Eq. (5.19). . . . .	43
5.12	Confronto tra il carico idraulico totale della corrente in arrivo e di quella defluente nel partitore (a) e nell'emissario (b); in evidenza i punti con $i = 5\%$ e $B_1 = 9$ cm. . . . .	44
5.13	Griglia di misura delle velocità nell'ipotesi di simmetria del profilo. . . . .	45
5.14	Andamento della velocità lungo le verticali di misura. . . . .	45
5.15	Andamento della velocità lungo le orizzontali di misura. . . . .	46
5.16	Andamento spaziale della velocità nella sezione di misura. . . . .	46
5.17	Solido delle velocità. . . . .	46
5.18	Relazione tra la portata derivata, adimensionalizzata rispetto alla portata di stato critico, e la distanza adimensionale dal fondo $\delta$ , al variare del numero di Froude della corrente in arrivo, variabile con continuità (a) e suddiviso in classi (b). . . . .	48

5.19	Relazione tra i coefficienti della relazione $\frac{Q_1}{Q_{c,1}} = m \cdot \delta + n$ e il numero di Froude della corrente in arrivo. . . . .	49
5.20	Efficienza del partitore al variare di $d$ (a), di $B_1$ (b) e di $i$ (c)	50
5.21	Scale di deflusso di moto uniforme del canale immissario, al variare di $i$ . . . . .	51
6.1	Scala di deflusso (a) ed efficienza (b) del partitore semi-frontale per le dimensioni di progetto; in evidenza la condizione di progetto e quella di stato critico. . . . .	54
7.1	Tipi di imbocco: a spigolo vivo (a), a calice (b), a vortice (c).	59
7.2	Scala di deflusso di un pozzo di caduta ( $h_0$ è il carico sullo stramazzo quando vige il <i>weir flow</i> , $h_b$ è il carico sul battente quando vige l' <i>orifice flow</i> , $h_m$ e $h_v$ sono rispettivamente il carico di monte e di valle quando vige il <i>full flow</i> ). . . . .	60
8.1	Tubo addizionale interno; la sagomatura del bordo superiore è una variabile della sperimentazione di Binnie (1938) e di Anwar (1965). . . . .	63
8.2	<i>Free flow</i> e <i>full flow</i> nella sperimentazione di Binnie (Binnie, 1938) su tubi di diametro interno pari a 2.54 cm. . . . .	64
8.3	<i>Borda Free flow</i> e <i>Borda full flow</i> nella sperimentazione di Binnie (Binnie, 1938) su tubi di diametro interno pari a 2.54 cm.	65
8.4	Condizioni di deflusso secondo Anderson e altri (1971). . . . .	69
8.5	Possibili cause di vortici secondo Durgin e Hecker (1978): deviazione (a), profili di velocità (b), ostruzione (c). . . . .	71
8.6	Classificazione dei vortici in base alla posizione: superficiale (a) e subsuperficiale (b). . . . .	72
8.7	Classificazione dei vortici in base allo sviluppo rispetto all'imbocco: non sviluppato (a), critico (b), completamente sviluppato (c). . . . .	72
8.8	Classificazione ARL dei vortici in base alla capacità di trasporto.	73
9.1	Pianta dell'apparato sperimentale; tutte le dimensioni sono espresse in [mm]. . . . .	76
9.2	Dettagli dell'impianto di sollevamento: pannello di controllo (a) e saracinesca (b). . . . .	77
9.3	Vista laterale, non in scala, dell'apparato sperimentale; lo spessore delle pareti della vasca è di 1.5 cm, quello della cornice del filtro è di 7 cm. . . . .	78
9.4	Particolare dell'imbocco: DN100 e dN50 (tutte le misure sono espresse in [mm]). . . . .	78
9.5	Particolare dell'imbocco: DN70 e dN30 (tutte le misure sono espresse in [mm]). . . . .	79

9.6	Particolare dell'imbocco: DN50 e $d = 0$ (tutte le misure sono espresse in [mm]). . . . .	79
9.7	Sezione longitudinale dei tubi sperimentali: DN100 e dN50 (a); DN70 e dN30 (b) e DN50 (c). In evidenza la disposizione delle prese di pressione (tutte le misure sono espresse in [mm]).	80
9.8	Manometro ad acqua (a sinistra) e a mercurio (a destra) per la misura della portata inviata; in vista le condotte di alimentazione ( $\Phi 100$ , $\Phi 200$ e $\Phi 300$ dal basso verso l'alto). . .	81
9.9	Vasca venturimetrica per la taratura dei manometri differenziali.	82
9.10	Scale di deflusso dei manometri differenziali ad acqua e a mercurio per l'alimentazione $\Phi 100$ (a) e $\Phi 200$ (b). . . . .	82
9.11	Quadro piezometrico (a) e vuotometri Bourdon (b). . . . .	84
9.12	Variabili della sperimentazione in assenza (a) e in presenza (b) di aeroforo. . . . .	86
10.1	Scale di deflusso per le configurazioni 1, 30, 38 e 39 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN100, $d = 0$ mm, $n = 0$ .	91
10.2	Scale di deflusso per le configurazioni 40, 47, 53 e 58 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN70, $d = 0$ mm, $n = 0$ .	92
10.3	Scale di deflusso per le configurazioni 59, 60, 61 e 62 dalla lunghezza maggiore a quella minore: DN50, $d = 0$ mm, $n = 0$ .	92
10.4	Scale di deflusso per le configurazioni 1, 39, 40, 58, 59 e 62: $d = 0$ mm, $n = 0$ . . . . .	93
10.5	Scale di deflusso per le configurazioni 4, 5, 6, 7, 3, 2 e 8 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN70.	94
10.6	Scale di deflusso per le configurazioni 9, 10, 11, 12 e 13 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN50.	95
10.7	Scale di deflusso per le configurazioni 14, 15, 16 e 17 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, LN1.5, dN30.	96
10.8	Scale di deflusso per le configurazioni 1, 14, 17, 9, 13, 4 e 8: DN100, LN1.5. . . . .	96
10.9	Scale di deflusso per le configurazioni 18, 19, 20 e 21 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN70, LN1. .	97
10.10	Scale di deflusso per le configurazioni 22, 23, 24 e 25 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN50, LN1. .	97
10.11	Scale di deflusso per le configurazioni 26, 27, 28 e 29 dagli affondamenti maggiori a quelli minori: DN100, dN30, LN1. .	98
10.12	Scale di deflusso per le configurazioni 30, 26, 29, 22, 25, 18 e 21: DN100, LN1. . . . .	98
10.13	Scale di deflusso per le configurazioni 32, 33, 34 e 31: DN100, LN0.5. . . . .	99
10.14	Scale di deflusso per le configurazioni 35, 36 e 37: DN100, dN30, LN0.5. . . . .	100

10.15	Scale di deflusso per le configurazioni 41, 42 e 43: DN70, dN50, LN1.5. . . . .	100
10.16	Scale di deflusso per le configurazioni 46, 45 e 44: DN70, dN30, LN1.5. . . . .	101
10.17	Scale di deflusso per le configurazioni 48 e 49: DN70, dN50, LN1. . . . .	101
10.18	Scale di deflusso per le configurazioni 50, 51 e 52: DN70, dN30, LN1. . . . .	102
10.19	Scale di deflusso per le configurazioni 54 e 55: DN70, dN50, LN0.5. . . . .	102
10.20	Scale di deflusso per le configurazioni 56 e 57: DN70, dN30, LN0.5. . . . .	103
10.21	Scale di deflusso per le configurazioni 56, 52, 45, 57, 52 e 44: DN70, dN30. . . . .	104
10.22	Scale di deflusso per le configurazioni 10, 32, 18 e 4: DN100. . . . .	104
10.23	Scale di deflusso per le configurazioni 39, 66, 67, 62 e 69: $d = 0$ . . . . .	105
10.24	Scale di deflusso per la configurazione 39: DN100, $L = 2D$ . . . . .	106
10.25	Scale di deflusso per la configurazione 62: DN50, $L = 3D$ . . . . .	106
10.26	Andamento delle pressioni per le configurazioni 31, 28, 21, 20: DN100, LN1.5. . . . .	107
10.27	Andamento delle pressioni per le prove 378, 379, 380, 381: DN100, LN1. . . . .	108
10.28	Andamento delle pressioni per le prove 477, 478, 479, 480: DN100, LN0.5. . . . .	108
10.29	Andamento delle pressioni per le prove 508, 514, 506: DN70, LN1.5. . . . .	108
10.30	Andamento delle pressioni per le prove 560, 561, 562, 563: DN70, LN1. . . . .	109
10.31	Andamento delle pressioni per le prove 612, 611, 610, 609, 608: DN70, LN0.5. . . . .	109
10.32	Andamento delle pressioni per le prove 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79: DN100, LN1.5, dN70, $n = 7$ . . . . .	111
10.33	Andamento delle pressioni per le prove 155, 150, 151, 152, 153, 154: DN100, LN1.5, dN50, $n = 7$ . . . . .	111
10.34	Andamento delle pressioni per le prove 200, 201, 202, 203, 204, 205: DN100, LN1.5, dN30, $n = 6$ . . . . .	111
10.35	Andamento delle pressioni per le prove 250, 251, 252, 253, 249, 254, 255, 256: DN100, LN1, dN70, $n = 7$ . . . . .	112
10.36	Andamento delle pressioni per le prove 297, 298, 299, 300, 307: DN100, LN1, dN50, $n = 7$ . . . . .	112
10.37	Andamento delle pressioni per le prove 342, 344, 345: DN100, LN1, dN30, $n = 6$ . . . . .	113

10.38	Registrazione delle pressioni ai vuotometri per una durata pari a 60 secondi, con riferimento alle prove 38 (a) (DN100, LN1.5) e 382 (b) (DN100, LN1); $z$ è la distanza dalla sezione di imbocco del pozzo. . . . .	114
10.39	Variazione nel tempo del tirante idrico $h$ per le prove 166 (a), 165 (b), 164 (c) e 163 (d): DN100, dN50, LN1.5. . . . .	115
10.40	Misure della portata d'aria $Q_a$ rispetto alla portata liquida $Q$ per le configurazioni 4, 5, 6, 7, e 8: DN100, dN70, LN1.5. . .	116
10.41	Vortice a pressione atmosferica durante una prova sperimentale in <i>weir flow</i> . . . . .	117
10.42	Stadi evolutivi di un vortice: <i>dimple</i> (a), stadi intermedi (b, c, d), <i>air core vortex</i> (e), <i>dimple</i> (f). . . . .	118
10.43	Intrappolamento di aria a seguito della formazione di un vortice in depressione in condizione di <i>full flow</i> . . . . .	119
10.44	Influenza dei vortici sul tirante: tirante indisturbato $h = 40.5$ cm (a) e innalzamento ad $h = 41.5$ cm conseguente alla formazione della sezione contratta, visibile come luminescenza in prossimità dell'imbocco (b). . . . .	120
11.1	Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. eq11.5 adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni prive di aeroforo. . . . .	123
11.2	Dipendenza di $a$ dal parametro $D_{eq}/L_{full}$ per le configurazioni prive di aeroforo ( $R^2 = 92\%$ ). . . . .	123
11.3	Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.9) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni prive di aeroforo. . . . .	124
11.4	Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.5) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	125
11.5	Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante l'Eq. (11.5) con $a = 0.90$ adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	126
11.6	Dipendenza dal raggio idraulico $R$ dei residui dimensionali (a) e del parametro $a$ (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	126
11.7	Confronto tra le portate osservate e calcolate mediante le Eqq. (11.5) e (11.10) adimensionali (a) e dimensionali (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ . . . . .	127
11.8	Confronto tra le misure di pressione e la teoria dei tubi lisci per il DN100 (a) e il DN70 (b). . . . .	129

11.9	Perdita di carico localizzata $\xi$ per le configurazioni prive di aeroforo in funzione del rapporto $L_{full}/D_{eq}$ (a); confronto tra la portata osservata e quella calcolata imponendo $\xi_m = 0.2238$ (b). In evidenza le fasce di errore al 10%. . . . .	130
11.10	Perdita di carico localizzata $\xi$ per le configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ in funzione del rapporto $L_{full}/D_{eq}$ (a) e confronto tra la portata osservata e quella calcolata, con in evidenza le fasce di errore al 10% (b). . . . .	131
11.11	Perdita di carico localizzata $\xi$ per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ in funzione del rapporto $L_{full}/D_{eq}$ . . . . .	134
11.12	Perdita di carico localizzata media $\xi_m$ per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ in funzione del raggio idraulico $R$ , con $R^2 = 99.9\%$ (a) e confronto tra la portata osservata e quella calcolata mediante l'Eq. (11.24) (b). In evidenza le fasce di errore al 10%. . . . .	134
11.13	Andamento del coefficiente di portata $C_d$ rispetto al tirante in vasca $h$ per le configurazioni DN100 (a), DN70 (b) e DN50 (c). . . . .	135
11.14	Dipendenza del coefficiente di portata medio $C_{d,m}$ dal diametro del pozzo $D_{eq}$ (a) e dalla lunghezza $L_{full}$ (b). . . . .	136
11.15	Dipendenza del coefficiente di portata $C_d$ dal rapporto $L_{full}/D_{eq}$ ( $R^2 = 88\%$ ). . . . .	136
11.16	Andamento del coefficiente di portata $C_d$ rispetto al tirante in vasca $h$ per le configurazioni DN100 dN70 (a), DN100 dN50 (b), DN100 dN30 (c), DN70 dN50 (d) e DN70 dN30 (e) con $n \geq 3$ . . . . .	138
11.17	Andamento del coefficiente medio di portata $C_{d,m}$ con il rapporto $L_{full}/D_{eq}$ per le configurazioni dotate di aeroforo con $n \geq 3$ ( $R^2 = 76\%$ ). . . . .	140
11.18	Andamento del coefficiente di portata $C_d$ rispetto al tirante in vasca $h$ per le configurazioni DN100 dN70 (a), DN100 dN50 (b) e DN100 dN30 con $n < 3$ . . . . .	140
11.19	Andamento del coefficiente medio di portata $C_{d,m}$ con il rapporto $L_{full}/D_{eq}$ (a) e dipendenza del coefficiente $C_{d,R}$ mediato sulla lunghezza dal raggio idraulico $R$ (b) per le configurazioni dotate di aeroforo con $n < 3$ ( $R^2 = 99\%$ ). . . . .	140
11.20	Andamento del parametro $a$ (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti $C_{d,m}$ (b) in funzione del rapporto $D_{eq}/L_{full}$ ; i coefficienti di determinazione sono rispettivamente pari al 77% e 78%. . . . .	143

11.21	Andamento del parametro $a$ (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti $C_{d,m}$ (b) in funzione del rapporto $D_{eq}/L_{full}$ . Le due curve hanno rispettivamente $R^2 = 70\%$ e $R^2 = 75\%$ . . . . .	143
11.22	Andamento del parametro $a$ (a) e del coefficiente di portata mediato sui tiranti $C_{d,m}$ (b) in funzione del raggio idraulico $R$ . Le due curve hanno rispettivamente $R^2 = 67\%$ e $R^2 = 77\%$	144
11.23	Scale di deflusso adimensionali per le configurazioni prive di aeroforo: DN50 (a), DN70 (b) e DN100 (c). . . . .	145
11.24	Sintesi delle configurazioni prive di aeroforo (a) e zoom sul regime <i>weir</i> e <i>transitional</i> (b); in evidenza le Eq. (11.31), (11.32) e (11.33). . . . .	146
11.25	Scale di deflusso adimensionali per le configurazioni dotate di aeroforo: DN70 dN50 (a), DN70 dN30 (b), DN100 dN70 (c), DN100 dN50 (d) e DN100 dN30 (e). . . . .	147
11.26	Sintesi delle configurazioni dotate di aeroforo (a) e zoom sul regime <i>weir</i> e <i>transitional</i> (b); in evidenza le Eq. (11.31), (11.34) e (11.33). . . . .	148
11.27	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 31, 28, 21, 20: DN100, LN1.5. . . . .	149
11.28	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 378, 379, 380, 381: DN100, LN1. . . . .	149
11.29	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 477, 478, 479, 480: DN100, LN0.5. . . . .	150
11.30	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 508, 514, 506: DN70, LN1.5. . . . .	150
11.31	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 560, 561, 562, 563: DN70, LN1. . . . .	150
11.32	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 612, 611, 610, 609, 608: DN70, LN0.5. . . . .	151
11.33	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79: DN100, LN1.5, dN70, $n = 7$ . . . . .	151
11.34	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 155, 150, 151, 152, 153, 154: DN100, LN1.5, dN50, $n = 7$ . . . . .	151
11.35	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 200, 201, 202, 203, 204, 205: DN100, LN1.5, dN30, $n = 6$ . . . . .	152
11.36	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 250, 251, 252, 253, 249, 254, 255, 256: DN100, LN1, dN70, $n = 7$ . . . . .	152
11.37	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 297, 298, 299, 300, 307: DN100, LN1, dN50, $n = 7$ . . . . .	152
11.38	Andamento delle pressioni adimensionali per le prove 342, 3443, 344, 345: DN100, LN1, dN30, $n = 6$ . . . . .	153

11.39	Misure sperimentali della portata d'aria relative alle configurazioni caratterizzate da DN100, dN70, LN1.5 (a) e relativa adimensionalizzazione (b). . . . .	154
11.40	Regime di <i>Borda free flow</i> : confronto tra i dati sperimentali e l'Eq. (11.36) con $\mu = 0.70$ . . . . .	154
11.41	Regimi di deflusso teorici in assenza di aeroforo. . . . .	156
11.42	Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con $n \geq 3$ . . . . .	157
11.43	Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con $n < 3$ e $R = 0.8$ cm. . . . .	159
11.44	Regimi di deflusso teorici in presenza di aeroforo con $n < 3$ e $R = 1.8$ cm. . . . .	159

# Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche idrauliche della corrente prevista nella Nuova Collettrice di via Tasso ad interventi ultimati. . . . .	3
4.1	Sintesi degli esperimenti. . . . .	33
5.1	Valori sperimentali dei coefficienti $m$ e $n$ . . . . .	48
6.1	Caratteristiche geometriche del partitore semi-frontale e valori teorici di portata. . . . .	55
6.2	Valori caratteristici del partitore semi-frontale in condizioni di progetto. . . . .	55
9.1	Diametro nominale, interno, esterno e spessore dei tubi sperimentali. . . . .	86
9.2	Lunghezze nominali. . . . .	87
9.3	Sintesi delle configurazioni sperimentate. . . . .	88
11.1	Configurazioni con $d = 0$ . . . . .	130
11.2	Configurazioni con $n \geq 3$ . . . . .	132
11.3	Configurazioni con $n < 3$ . . . . .	133
11.4	Valori di $C_{d,m}$ per le configurazioni $d = 0$ . . . . .	136
11.5	Valori di $C_{d,m}$ per le configurazioni $n \geq 3$ . . . . .	139
11.6	Valori di $C_{d,m}$ per le configurazioni $n < 3$ . . . . .	141
12.1	Dati sperimentali . . . . .	168
12.2	Profilo di velocità nella sezione di misura. . . . .	170
12.3	Altezze cinetiche nella sezione di misura. . . . .	170
12.4	Dati sperimentali . . . . .	171
12.5	Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1.5. . . . .	187
12.6	Misure di altezza piezometrica [cm]: DN100, LN1. . . . .	189
12.7	Misure di altezza piezometrica [cm]: DN70. . . . .	191
12.8	Misure di altezza piezometrica [cm]: DN50. . . . .	191

12.9 Misura della portata d'aria . . . . .	191
--	-----

# Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Prof. Giuseppe Del Giudice, che in questi anni è stato una preziosa guida e prima ancora un amico; grazie per i consigli, i suggerimenti, gli incoraggiamenti e le chiacchierate. Un doveroso ringraziamento va anche al Prof. Giacomo Rasulo, per avermi dato fiducia fin dall'inizio, e al Prof. Armando Carravetta, per il supporto nella scrittura di questa tesi.

Grazie a tutti gli amici e colleghi che mi hanno dato una mano in laboratorio, ed in particolare a Daniele Uno, con il quale mi sono deliziata a maledire ogni vortice, a Daniele Due, perché non è da tutti offrirsi di aiutare un'amica in difficoltà il 31 luglio alle 2 del pomeriggio con 50° all'ombra, ad Andrea (cosa non si farebbe per non studiare) e a Fulvio ("vengo perché voglio capire in cosa gli ingegneri sarebbero migliori degli architetti").

Grazie a tutte le persone che hanno reso questi ultimi tre anni indimenticabili e che mi hanno trattata come il cucciolo di panda che in realtà sono (cit.): Vittorio, Oreste, Chiara, Enzo, Luca, Daniele, Francesco... grazie per le risate, le imitazioni, i caffè, le chiacchiere sui massimi sistemi, e soprattutto per tutte le volte in cui all'unisono abbiamo esclamato "ho già mangiato!" con l'intonazione che solo noi sappiamo. Grazie a Barbara, idraulica di adozione, per esserci sempre stata, fin dal primo giorno in cui, unica, ebbe il coraggio di alzare la mano per rispondere alla domanda del professore: correva l'anno 2004. Grazie a Gianni Urso, per i suoi racconti e la sua saggezza: i nati nell'Ottocento sono sempre i migliori.

Un ultimo ringraziamento, quello più importante, va alla mia famiglia: non siamo tipi sdolcinati perciò dico solo *eeeh*, e voi capirete. Ultimo, ma primo, ad Andrea, che si prende cura di me come nessun altro potrebbe mai.

Quasi dimenticavo! Grazie a John, a George, a Masami e a Jo, perchè essere ingegneri è bello, ma avrei comunque preferito essere un'abitante della Terra di Mezzo munita di spada laser e devota ad Atena, e possibilmente scrivere questa tesi sulla pergamena, masticando una piuma di zucchero.