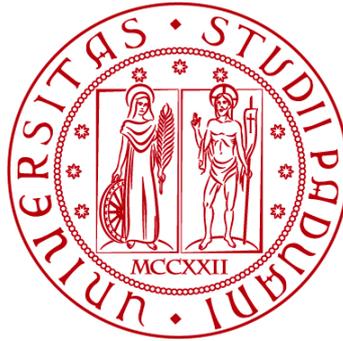


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering



TESI DI LAUREA

**Indagine sperimentale sulla doppia onda generata
da una corrente rapida che si immette
istantaneamente a monte di una corrente
preesistente**

Relatore:
Chiar.mo PROF. ANDREA DEFINA

Laureando:
Matricola:

MARIANNA PALLERI
2060160

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Indice

1	INTRODUZIONE	1
2	INQUADRAMENTO TEORICO GENERALE ALLA BASE DEL MODELLO.....	3
2.1	Modello di doppia onda.....	4
2.2	Il caso in cui l'onda di monte non si propaga	11
3	INDAGINI SPERIMENTALI.....	13
3.1	Dati sperimentali disponibili in letteratura e i loro limiti.....	13
3.2	Apparato sperimentale, dispositivi a corredo e procedure sperimentali	16
3.2.1	Strumenti di laboratorio	16
3.2.2	Procedure sperimentali	18
3.3	Risultati delle indagini sperimentali.....	25
3.3.1	Resistenza prodotta dal dispositivo poroso	28
3.3.2	Onda di tipo A.....	31
3.3.3	Onda di tipo B	35
3.3.4	Onda di tipo C	39
3.3.5	Onda di tipo D.....	43

3.3.6	Onda di tipo Aw	48
3.3.7	Onda di tipo Cw	51
4	CONCLUSIONI	55
5	APPENDICE.....	59
6	BIBLIOGRAFIA	67

1 Introduzione

La seguente tesi si pone lo scopo di analizzare sperimentalmente ciò che succede a seguito dell'immissione istantanea di una corrente rapida a monte di un flusso preesistente; in particolare, si indaga la formazione di un sistema composto da due fronti ondosi che si creano a seguito dell'evento.

Il sistema di doppia onda, che si sviluppa nel corso d'acqua, è tipicamente caratterizzato dal distanziamento nel tempo dei due fronti che possono essere, positivi o negativi, sia a fronte ripido sia a fronte diffuso.

Lo studio di tale fenomeno nasce quando, nel 1949 al convegno d'Idraulica di Milano, venne posta un'osservazione riguardante a ciò che succedeva nel modello di un impianto idroelettrico. In tale modello, la corrente lenta preesistente nel canale di scarico, veniva sostituita da una corrente supercritica, immessa bruscamente; nel canale sfociavano sia le acque delle turbine che quelle di troppo pieno della vasca di scarico dell'impianto e, quando le turbine venivano chiuse, le acque, deviate dalla condotta forzata, arrivavano fin il serbatoio, sfociando dagli scarichi e arrivando nel canale di scarico con una velocità più elevata. Si è notato come una configurazione a doppio fronte ripido si sia creata nel momento della manovra di chiusura, in particolare, di come si sia creato, tra i due fronti, un innalzamento del livello rispetto il livello iniziale che era presente nel canale, come se questo fosse una sorta di tronco liquido di corrente (Figura 1, type A). A seguito di questa scoperta Montuori C. (1968) ha sviluppato una sua teoria matematica del problema che, è stata ripresa.

In questa tesi, dopo un inquadramento teorico iniziale, si è proceduto con la riproduzione sperimentale delle sei configurazioni che si possono ottenere cioè: quattro con riferimento alle condizioni di efflusso libero e due con riferimento ad un efflusso rigurgitato. La riproduzione

di tali configurazioni è stata effettuata in canaletta nel laboratorio di idraulica dell'Università degli studi di Padova, manovrando tre diversi tipi di paratoie, sia singolarmente che simultaneamente.

Si vuole provare la veridicità della procedura teorica sviluppata in passato da Montuori (1968) e Montuori e Greco (1973). Questa procedura è utilizzata per l'analisi e la previsione di questo tipo di configurazioni, se ne appura la corrispondenza sperimentale attraverso un sostanziale numero di misure. Il modello che vuole essere verificato permette di stimare le caratteristiche delle onde che si vengono a creare, quali l'altezza e la velocità dei fronti d'onda; il modello utilizzato permette, inoltre, di prevedere le configurazioni a doppio fronte di sistemi ondulatori che si possono sviluppare in diverse situazioni di interesse pratico quali, ad esempio, le onde che si creano in un canale a pelo libero a seguito dell'urto con flussi di coda di opere situate a monte.

2 Inquadramento teorico generale alla base del modello

Di seguito si riporta il procedimento teorico, utilizzato nel modello, per la previsione delle onde che si possono formare quando un flusso di corrente supercritica si immette in un flusso di corrente preesistente.

Si considerino le seguenti condizioni costanti nel tempo: una corrente indisturbata avente velocità U_0 e tirante Y_0 costanti, e una corrente rapida che viene messa impulsivamente da monte con velocità U_1 e un tirante Y_1 tali che $F_1 = U_1/\sqrt{gY_1} > 1$. Da queste condizioni nascono due onde a differenti celerità che, propagandosi verso valle, si distanziano l'una l'altra sempre di più; nonostante questo, sia la profondità dell'acqua che la velocità tra i due fronti ondososi non varia nello spazio e nel tempo.

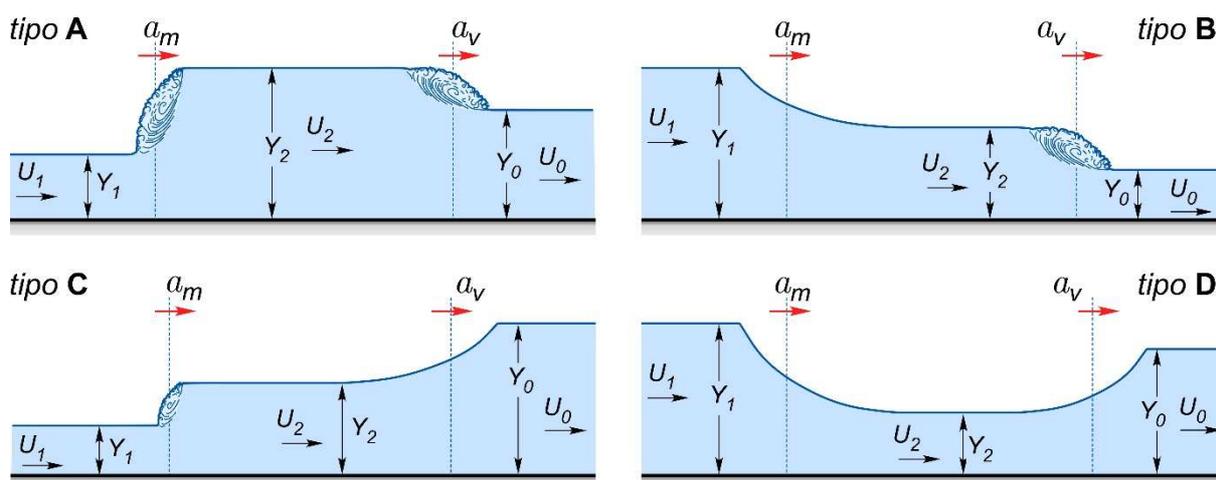


Figura 1. Configurazioni a doppio fronte possibili

Generalmente, onde di altezze importanti, si formano quando il campo di moto ondososo subisce delle variazioni delle condizioni al contorno, questi disturbi possono essere sia interni che esterni al sistema. Le onde che si possono formare possono essere di compressione o di espansione a seconda delle condizioni iniziali e del tipo di causa che determina la formazione delle stesse. Le onde di compressione sono caratterizzate un fronte ripido attraverso il quale si determina una quantità di energia dissipata non trascurabile; le onde di espansione, invece, sono

caratterizzati da un fronte diffuso, la cui lunghezza tende ad aumentare nel tempo e la dissipazione di energia risulta essere molto bassa. In generale, le onde a fronte ripido sono onde positive mentre, le onde a fronte diffuso sono le onde negative.

È interessante notare in Figura 1 che, pur avendo onde a fronte ripido, che dovrebbero essere normalmente positive, le onde di monte delle configurazioni A e C sono onde negative. Inoltre, considerando le configurazioni B e D, si può notare che l'onda di monte è un'onda a fronte diffuso positiva piuttosto che negativa.

Analizzando matematicamente il problema, si consideri un volume di controllo dove un'onda si propaga da monte a valle con celerità a , a valle si ha un tirante Y_0 e una velocità U_0 e a monte il flusso è caratterizzato da un tirante Y_1 e una velocità U_1 . Applicando a suddetto volume di controllo due equazioni: l'equazione di bilancio di massa e bilancio di quantità di moto; essendo le variabili U_1 , Y_1 e a le incognite, queste risultano di numero superiore alle equazioni disponibili, si ottiene che una tra queste variabili può essere definita a priori. Dunque, nel il caso in esame, in cui sia il tirante che la velocità di monte sono noti, non si formerà una sola onda ma due.

Nei seguenti paragrafi viene riportata e spiegata la teoria di base del modello utilizzato per l'analisi di queste configurazioni.

2.1 Modello di doppia onda

Il modello di doppia onda che si viene a creare nelle quattro configurazioni in Figura 1 si basa sulle seguenti ipotesi: canale rettangolare molto largo; non si tiene conto della tipologia di onda (positiva o negativa, di espansione o di compressione); si considerano trascurabili le tensioni tangenziali al fondo e la pendenza la fondo del canale.

La risoluzione delle equazioni di bilancio di massa e di quantità di moto viene riportata di seguito.

Considerando un moto relativo dell'onda di monte, le equazioni di bilancio di massa e di quantità di moto sono:

$$(U_1 - a_m)Y_1 = (U_2 - a_m)Y_2 \quad (1)$$

$$\frac{Y_1^2}{2} + (U_1 - a_m)^2 \frac{Y_1}{g} = \frac{Y_2^2}{2} + (U_2 - a_m)^2 \frac{Y_2}{g} \quad (2)$$

Le incognite nelle equazioni (1) e (2) sono il tirante Y_2 , la velocità U_2 e la celerità dell'onda di monte a_m mentre, le variabili note, sono Y_1 e U_1 .

Viene applicato il bilancio di massa e di quantità di moto anche all'onda di valle:

$$(U_2 - a_v)Y_2 = (U_0 - a_v)Y_0 \quad (3)$$

$$\frac{Y_2^2}{2} + (U_2 - a_v)^2 \frac{Y_2}{g} = \frac{Y_0^2}{2} + (U_0 - a_v)^2 \frac{Y_0}{g} \quad (4)$$

Le variabili incognite Y_2 , U_2 , a_m e a_v (celerità dell'onda di valle) possono essere risolte utilizzando le quattro equazioni riportate sopra; combinando le equazioni (1) e (2) ed eliminando, in questo modo, la velocità U_2 , si ottiene:

$$a_m = U_1 - \sqrt{gY_2} \sqrt{\frac{Y_1 + Y_2}{2Y_1}} \quad (5)$$

Utilizzando lo stesso procedimento per le equazioni (3) e (4), risulta:

$$a_v = U_0 - \sqrt{gY_2} \sqrt{\frac{Y_0 + Y_2}{2Y_0}} \quad (6)$$

Le equazioni (5) e (6) possono essere risolte tramite procedimento iterativo, fino alla convergenza dei risultati.

Il metodo che, più correttamente, si addice alla risoluzione analitica delle onde caratterizzate da un fronte diffuso, è il metodo delle caratteristiche, il quale risulta essere piuttosto complesso. Altrimenti, una descrizione delle configurazioni sufficientemente accurata, si ottiene dal bilancio di quantità di moto, stimando le celerità della testa e del piede delle onde di espansione.

Prestando ora attenzione alle configurazioni di tipo B e D, la celerità della testa e dell'onda di monte è $a_{m1} = U_1 - \sqrt{gY_1}$ mentre, la celerità del piede dell'onda di monte è pari a $a_{m2} = U_2 - \sqrt{gY_2}$; in secondo luogo, considerando le configurazioni di tipo C e D, la celerità della testa dell'onda di valle è $a_{v1} = U_0 - \sqrt{gY_0}$, mentre, quella del piede, sempre dell'onda di valle, risulta essere pari a $a_{v2} = U_2 - \sqrt{gY_2}$.

Nella seguente tesi si pone il problema di determinare il dominio per il quale ogni configurazione in Figura 1 si può verificare, in particolare, il verificarsi di una configurazione di onde piuttosto che di un'altra dipende dal numero di Froude corrispondente alla corrente rapida, che si immette nel corso d'acqua preesistente tale per cui nel canale si formi un'unica onda anziché un'onda doppia; questo parametro è pari a $\tilde{F}_1 = \tilde{U}_1 / \sqrt{gY_1}$. Una volta calcolato \tilde{F}_1 , lo si confronta con il numero di Froude F_1 corrispondente alla corrente preesistente.

Sempre con riferimento al caso in cui una corrente supercritica si immette a monte di una corrente preesistente, considerando U_0 e Y_0 rispettivamente la velocità e il tirante della corrente di valle e \tilde{U}_1 e \tilde{F}_1 rispettivamente la velocità e il tirante in corrispondenza della corrente di

monte; si effettua il bilancio di massa e il bilancio di quantità di moto in corrispondenza dei fronti ondosi che si creano:

$$(\tilde{U}_1 - a)Y_1 = (U_0 - a)Y_0 \quad (7)$$

$$\frac{Y_1^2}{2} + (\tilde{U}_1 - a)^2 \frac{Y_1}{g} = \frac{Y_0^2}{2} + (U_0 - a)^2 \frac{Y_0}{g} \quad (8)$$

Come precedentemente visto per le equazioni (5) e (6), anche in questo caso, si combinano le equazioni (7) e (8) ottenendo:

$$a = U_0 \pm \sqrt{gY_0} \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{Y_1^2}{Y_0^2} + \frac{Y_1}{Y_0} \right)} \quad (9)$$

Sostituendo l'espressione per la celerità a data dalla (9) Un nell'equazione di bilancio di massa (7), si ottiene:

$$\tilde{F}_1 \sqrt{\frac{Y_1}{Y_0}} = F_0 \pm \left(1 - \frac{Y_0}{Y_1} \right) \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{Y_1^2}{Y_0^2} + \frac{Y_1}{Y_0} \right)} \quad (10)$$

Si riscrive la (10) ponendo $\mu = Y_0/Y_1$ e $\Delta F = (1 - \mu) \sqrt{\left(\frac{1}{\mu} + 1\right)/2}$; allora il numero di Froude della corrente di monte diviene:

$$\tilde{F}_1 = F_0 \sqrt{\mu} \pm \Delta F \quad (11)$$

Si valuta se il numero di Froude \tilde{F}_1 risulta essere maggiore o minore di F_1 ; Si osserva che le possibilità che possono nascere da questo confronto sono quattro poiché, come si osserva dall'equazione (11), il numero di Froude della corrente di monte può assumere due valori, a

seconda che si sommino o si sottraggano i due fattori dell'equazione. Si identificano, nel seguente modo, le quattro configurazioni riportate in Figura 1

Tipo A	se	$F_1 > F_0\sqrt{\mu} + \Delta F$	e	$F_1 > F_0\sqrt{\mu} - \Delta F$
Tipo B	se	$F_1 < F_0\sqrt{\mu} + \Delta F$	e	$F_1 > F_0\sqrt{\mu} - \Delta F$
Tipo C	se	$F_1 > F_0\sqrt{\mu} + \Delta F$	e	$F_1 < F_0\sqrt{\mu} - \Delta F$
Tipo D	se	$F_1 < F_0\sqrt{\mu} + \Delta F$	e	$F_1 < F_0\sqrt{\mu} - \Delta F$

(12)

Il campo di esistenza di ciascuna configurazione viene riportato di seguito in Figura 2:

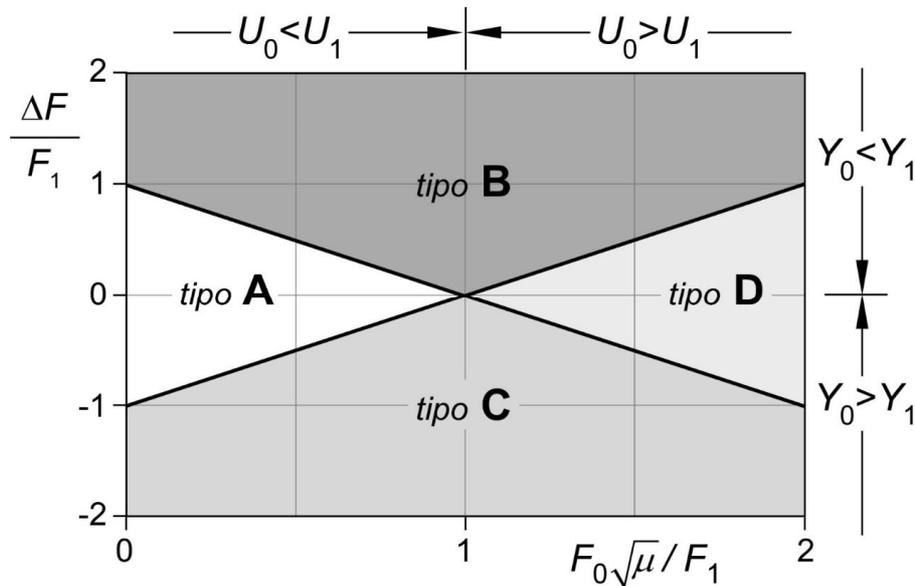


Figura 2. Campo di esistenza dei tipi di configurazioni possibili: tipo A, tipo B, tipo C, tipo D.

Dunque, i fronti ondosi sono controllati dalle condizioni riportate nelle relazioni (12), in particolare, il fronte d'onda di monte è controllato dalla condizione $F_1 \leq F_0\sqrt{\mu} + \Delta F$ mentre, il fronte d'onda di valle, dipende dalla diseuguaglianza $F_1 \leq F_0\sqrt{\mu} - \Delta F$.

Dal procedimento che è stato utilizzato per ricavare le equazioni utili alla classificazione delle diverse configurazioni, si osserva come i risultati non dipendano né dal tirante Y_2 né dal numero di Froude F_2 (riferiti al campo di moto intermedio) ma, esclusivamente, dalle condizioni al contorno di valle (Y_0 e U_0) e da quelle che arrivano da monte (Y_1 e U_1), semplificando, in questo modo, il procedimento rispetto il modello di Montuori (1968).

È importante osservare che le configurazioni B e D, riportate graficamente in Figura 1, sono caratterizzate da un'onda di monte di espansione avente $F_1 = \frac{U_1}{\sqrt{gY_1}} > 1$, la celerità relativa alla testa dell'onda è $a_{m1} = U_1 - \sqrt{gY_1} > 0$, quindi, necessariamente entrambe le onde della configurazione viaggeranno verso valle; questo non accade sempre per le onde di compressione che sono presenti nelle configurazioni di tipo A e C, in questo caso si può osservare un andamento dei fronti ondosi da monte a valle se e solo se $a_m > 0$.

Tenendo in considerazione ciò che è sopra riportato, affinché le due onde possano proseguire verso valle, bisogna rispettare dei vincoli, in particolare si pone $a_u = 0$ in modo tale da ricavare una condizione limite sia matematicamente che graficamente. Per prima cosa si esplicita la velocità U_2 dall'equazione (1) e dalla (3), dopodichè si pone l'uguaglianza tra le due:

$$(U_1 - a_m) \frac{Y_1}{Y_2} + a_m = (U_0 - a_v) \frac{Y_0}{Y_2} + a_v \quad (13)$$

Sostituendo ora a_v con l'equazione (6) e $a_m = 0$, si ottiene:

$$U_1^* \frac{Y_1}{Y_2} = U_0 + \sqrt{gY_2} \left(1 - \frac{Y_0}{Y_2}\right) \sqrt{\frac{Y_0 + Y_2}{2Y_0}} \quad (14)$$

Nell'equazione (14) si è posta pari a U_1^* , la velocità riferita alla condizione di $a_m = 0$, questa si può ricavare dall'equazione (5), considerando $U_1^* = U_1$:

$$U_1^* = \sqrt{gY_2} \sqrt{\frac{Y_1 + Y_2}{2Y_1}} \quad (15)$$

In questo modo la (14) e la (15) formano un sistema a due equazioni con due incognite (Y_2, U_1^*), mentre i valori U_0 e Y_0 sono quelli noti della corrente preesistente e Y_1 è dato dalla profondità della corrente che si immette istantaneamente da monte.

Risolvendo il sistema si ricava il vincolo per il quale si possono formare configurazioni a doppia onda, in particolare, si ricava U_1^* , cioè il minimo valore di velocità che consente che questo avvenga. Da questo si ricava il numero di Froude limite e si pone $\theta = Y_2/Y_1$ e $\mu = Y_0/Y_1$, sostituendo queste variabili nelle equazioni (14) e (15) e costruendo il sistema, si ottiene:

$$\sqrt{\mu(\theta + 1)} = F_0\mu\sqrt{2\theta} + (\theta - \eta)\sqrt{\mu + \theta} \quad (16)$$

Dall'equazione (16) si ricava il parametro θ , dopodichè è possibile ricavare il numero di Froude F_1^* :

$$F_1^* = \sqrt{\theta} \sqrt{\frac{1}{2}(1 + \theta)} \quad (17)$$

Se $F_1 > F_1^*$ allora le configurazioni a doppia onda di tipo A e di tipo C in Figura 1, possono formarsi ed entrambe le onde si muoveranno da monte verso valle; se $1 < F_1 < F_1^*$ allora queste configurazioni non saranno possibili perché l'onda di monte non riuscirà a propagarsi, ma rimarrà ferma nella sezione di monte quindi una sola onda si propagherà verso valle; quest'ultima può essere di diverso tipo in accordo con le condizioni riportate dalla (12).

2.2 Il caso in cui l'onda di monte non si propaga

Nel caso in cui $1 < F_1 < F_1^*$, il modello che è stato presentato nel paragrafo 2.1 non risulta accettabile perché comporterebbe $a_m < 0$, in questo caso l'onda di monte non riesce a propagarsi verso valle ma viene fermata a monte in due modi: o dalla corrente rapida in arrivo oppure da un blocco fisico a monte della configurazione, un esempio può essere la paratoia in Figura 9. Si formano così due configurazioni, che si aggiungono a quelle studiate nel paragrafo precedente e che si classificano come configurazioni di tipo A e di tipo C rigurgitate, queste vengono riportate in Figura 3 ed indicate rispettivamente di tipo Aw e Cw.

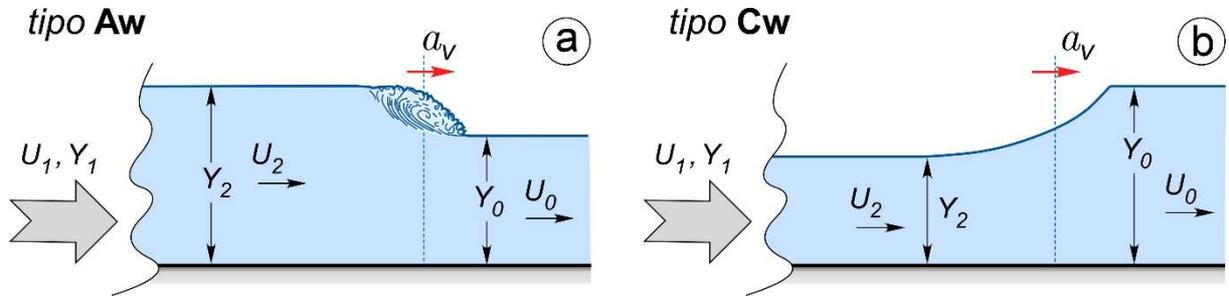


Figura 3. Configurazioni a fronte singolo di tipo Aw e di tipo Cw

Per ricavare un modello numerico adatto allo studio di queste configurazioni, si considerino l'equazione di bilancio di massa e di quantità di moto prese inizialmente, cioè la (1) e la (2): nella (2) si deve aggiungere un termine che possa esprimere correttamente il bilancio di quantità di moto, mentre, nella (1), vale ancora $a_m = 0$ e possiamo scrivere $U_2 = U_1 Y_1 / Y_2$. Sostituendo questo nelle equazioni (3) e (4) si ricava:

$$\left(\frac{U_1 Y_1}{Y_2} - a_v \right) Y_2 = (U_0 - a_v) Y_0 \quad (18)$$

$$\frac{Y_2^2}{2} + \left(\frac{U_1 Y_1}{Y_2} - a_v \right)^2 \frac{Y_2}{g} = \frac{Y_0^2}{2} + (U_0 - a_v)^2 \frac{Y_0}{g} \quad (19)$$

Ponendo a sistema la (18) e la (19) il termine di celerità scompare e risulta:

$$Y_2 = Y_0 - \frac{U_0 Y_2 - U_1 Y_1}{\sqrt{g Y_2}} \sqrt{\frac{2 Y_0}{Y_2 + Y_0}} \quad (20)$$

L'equazione (20) può essere risolta iterativamente, in modo da ricavare Y_2 . Una volta calcolato il tirante Y_2 si possono ricavare anche la velocità U_2 e la celerità dell'unica onda che si propaga verso valle a_v .

Tenendo conto di tutte le considerazioni fatte nei paragrafi 2.1 e 2.2, al fine di prevedere il tipo di configurazione che può nascere quando una corrente rapida si immette a monte di una corrente preesistente e le caratteristiche dell'onda doppia che così viene generata, si sono implementate tutte le equazioni ricavate in un foglio excel, il quale è stato utilizzato per la previsione teorica confrontata poi con i risultati delle indagini sperimentali.

3 Indagini sperimentali

In questo capitolo verranno elencate e spiegate le procedure sperimentali che sono state effettuate presso il laboratorio di idraulica dell'Università di Padova. Partendo dall'analisi dei risultati disponibili in letteratura e già visti nel capitolo 3.1, si passa alla spiegazione delle procedure sperimentali che sono state attuate al fine di ottenere tutte le configurazioni possibili. Vengono riportati i risultati ottenuti dalle prove sia per le configurazioni a doppio pronte che per le configurazioni a onda singola.

3.1 Dati sperimentali disponibili in letteratura e i loro limiti

I dati disponibili in letteratura, sui quali si è partiti per l'analisi sperimentale, sono stati sviluppati da Montuori e Greco (1973) e sono riportati in questo paragrafo. Si è notato come questi esperimenti abbiano però delle incongruenze teoriche, infatti, il modello teorico presuppone che la corrente di monte si immetta istantaneamente in quella preesistente cosa che non si è riuscito a fare rigorosamente tramite le indagini sperimentali effettuate in passato; queste prove posseggono una fase transitoria non istantanea ed un disturbo, in corrispondenza della paratoia utilizzata, non trascurabile. In questo punto i parametri misurati risentono molto di variazioni spaziali e temporali. Per realizzare tutte le prove è stato utilizzato: un canale artificiale di laboratorio di lunghezza pari a 18 m e larghezza di 0.77 m; talvolta, è stata utilizzata una paratoia di valle per mantenere un determinato tirante Y_0 ; una paratoia mobile a metà della canaletta che è stata manovrata, abbassandola o alzandola, per produrre il disturbo della corrente immettendo da monte un flusso avente Y_1 e U_1 . Sono state effettuate prove variando: le modalità di immissione di portata (tramite l'utilizzo della paratoia posta a metà canaletta) da monte; i valori iniziali di tirante e velocità, oltre che quelli immessi dalla corrente in arrivo. Complessivamente sono state effettuate 28 prove che vengono riportate di seguito in Tabella 1.

Tabella 1 Prove sperimentali effettuate da Montuori e Greco (1973). I parametri misurati sono i seguenti; w_0 è l'apertura della paratoia iniziale; Y_A è il tirante misurato a monte della paratoia prima della manovra; Q_0 è la portata in arrivo da monte e q_0 è la portata specifica; Y_0 è il tirante di moto indisturbato; w_1 è l'apertura della paratoia finale Y_1 è il tirante della sezione di monte che si stabilisce quando viene immesso il flusso, in pratica il tirante in corrispondenza della sezione di vena contratta; Y_B è il tirante misurato dopo la manovra; Y_2 è il tirante nella sezione intermedia; a_m e a_v sono rispettivamente la celerità dell'onda di monte e la celerità dell'onda di valle.

RUN	TIPO	w_0 (m)	Y_A (m)	Q_0 (m ³ /s)	q_0 (m ² /s)	Y_0 (m)	w_1 (m)	Y_1 (m)	Y_B (m)	Y_2 (m)	a_m (m/s)	a_v (m/s)
1	C	0.1	0.29	0.1	0.130	0.062	0.02	0.012	0.32	0.04	1.5	
2	C	0.1	0.29	0.1	0.130	0.062	0.04	0.025	0.305	0.045	1.42	
3	C	0.15	0.28	0.14	0.182	0.091	0.02	0.012	0.37	0.06	1.4	
4	C	0.15	0.28	0.14	0.182	0.093	0.04	0.025	0.33	0.065	1.45	
5	C			0.1	0.130	0.157	0.02	0.013	0.26	0.095	0.04	
6	C			0.1	0.130	0.157	0.04	0.025	0.245	0.115	0.15	
7	C			0.1	0.130	0.157	0.1	0.062	0.19	0.145	0.07	
8	C			0.12	0.156	0.174	0.02	0.013	0.3	0.105	0.05	
9	C			0.12	0.156	0.174	0.04	0.025	0.285	0.125	0.17	
10	C			0.12	0.156	0.174	0.1	0.062	0.23	0.155	0.12	
11	C			0.14	0.182	0.189	0.02	0.013	0.33	0.11	0.04	
12	C			0.14	0.182	0.189	0.04	0.025	0.31	0.135	0.18	
13	C			0.14	0.182	0.189	0.1	0.061	0.255	0.165	0.17	
14	C			0.16	0.208	0.2	0.02	0.013	0.355	0.115	0.06	
15	C			0.16	0.208	0.2	0.04	0.025	0.335	0.145	0.21	
16	C			0.16	0.208	0.2	0.1	0.06	0.285	0.175	0.19	
17	C			0.18	0.234	0.21	0.02	0.012	0.37	0.125	0.12	
18	C			0.18	0.234	0.21	0.04	0.025	0.35	0.15	0.3	
19	C			0.18	0.234	0.21	0.1	0.06	0.31	0.175	0.27	
20	B	0.019	0.57	0.0305	0.040	0.012	0.19	0.116	0.43	0.025		4
21	B	0.0095	0.57	0.0149	0.019	0.006	0.19	0.115	0.435	0.02		3.8
22	B	0.038	0.419	0.0505	0.066	0.024	0.19	0.115	0.31	0.035		3.6
27	A	0.0076	0.329	0.0085	0.011	0.1	0.0935	0.057	0.22	0.165	0.1	1.45
28	A	0.01	0.503	0.0126	0.016	0.122	0.0935	0.061	0.41	0.23	0.17	1.96

Con riferimento alla Tabella 1, dalla prova 1 alla prova 4 la configurazione è stata ottenuta partendo da una condizione di moto uniforme per poi abbassare istantaneamente la paratoia, si è creata una corrente supercritica; dalla prova 5 alla prova 19, sempre partendo da una condizione di moto uniforme, si è creato un efflusso libero abbassando istantaneamente la paratoia fino ad un certo livello; dalla prova 20 alla prova 22, si è partiti da condizioni di efflusso

libero con una certa apertura dello scudo utilizzato, si è mantenuto un efflusso libero alzando istantaneamente la paratoia; nella prova 27 e 28 si è partiti da una condizione di efflusso rigurgitato a una condizione di efflusso libero.

L'incertezza nelle misurazioni effettuate è dovuta: alla tipologia di strumenti che sono stati utilizzati in passato, in particolare, gli idrometri a punta, tramite i quali si sono misurati Y_2 (cioè il tirante intermedio trale due onde) e Y_B (cioè il tirante che si forma a monte della paratoia utilizzata, dopo la manovra), avevano una precisione di soli 5 mm; alla modalità di calcolo della celerità, stimata semplicemente cronometrando il tempo impiegato dall'onda per percorrere una determinata distanza.

Si osserva dalla Tabella 1 che le celerità dei fronti diffusi non sono state misurate a causa della difficoltà di ricavare un valore che mediasse adeguatamente la velocità dell'onda che, al contrario del caso di un'onda di compressione, non risulta avere un fronte netto. Si osserva, inoltre, che non sono riportati i valori della velocità U_1 poiché non sono stati misurati direttamente ma sono state utilizzate delle formule (Henderson,1966; Rouse, 1946) che considerano una portata per unità di larghezza e che si riportano di seguito:

$$U_1 = q_1 / (c_c w_1)$$

$$q_1 = c_{q1} w_1 \sqrt{2gY_B} \tag{21}$$

$$c_{q1} = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \frac{c_c w_1}{Y_B}}}$$

Nelle equazioni (21). compaiono vari parametri tra cui: il coefficiente di contrazione $c_c = 0.62$; Y_B cioè il tirante misurato a monte della paratoia dopo aver effettuato la manovra; w_1 che è l'apertura misurata dopo l'esecuzione del disturbo.

Sempre facendo riferimento alle misure effettuate da Montuori, si è osservata un'altra incongruenza tra le prove sperimentali ed il modello invece utilizzato, infatti la velocità lungo la verticale a valle ed in corrispondenza della paratoia, che è stata assunta costante, nelle prove reali, non lo è; questo fa sì che le prove 27 e 28, riguardanti la configurazione di tipologia A, non confermano rigorosamente la teoria alla base del modello. Allo stesso modo, neanche il numero di Froude della corrente preesistente si riesce a determinare. Si sottolinea che, in ogni caso sviluppato, è stato mantenuto $F_1 > 1$ e $F_1 > F_1^*$, in modo tale da permettere lo sviluppo delle configurazioni a doppio fronte, mentre, quelle a fronte singolo, non sono state trattate. Concludendo, come si osserva in Tabella 1 esperimenti per riprodurre la configurazione di tipologia D non sono stati portati avanti da Montuori.

3.2 Apparato sperimentale, dispositivi a corredo e procedure sperimentali

Per la riproduzione delle configurazioni possibili ci si è serviti di diversi strumenti di laboratorio; le tipologie di strumentazione e le modalità con cui sono state usate vengono riportate e spiegate di seguito.

3.2.1 Strumenti di laboratorio

Si introducono tutti gli strumenti utilizzati allo scopo di raccogliere dati ed informazioni riguardo le tipologie di onde, mostrate in Figura 1 ed in Figura 3.

Le prove sono state fatte nel laboratorio di idraulica dell'Università degli studi di Padova, in particolare, è stata adoperata una canaletta, lunga 6 m e larga 30 cm, sulla quale è stato possibile riprodurre le configurazioni facendo scorrere all'interno di essa diversi valori di portata. La canaletta è munita, a valle, di una paratoia a ventola che consente di regolare i livelli quando la corrente è lenta.

Si sono utilizzate 4 sonde acustiche per rilevare il livello dell'acqua. Dopo averle posizionate in maniera opportuna, su diverse sezioni della canaletta riportate in Figura 4, sono state tarate

in funzione della loro localizzazione all'interno della canaletta; per fare questo si è utilizzato un software di acquisizione, direttamente collegato ad un datalogger; il quale, oltre a mostrare l'andamento del livello in tempo reale; ha consentito la registrazione dei livelli ed il loro salvataggio.

Si è utilizzato anche un idrometro a punta, situato 23 cm a monte della sezione numero 6, cioè dove si localizzava la paratoia (Figura 4). Tramite questo strumento si è misurato il livello Y_A cioè, il livello a monte della paratoia prima della manovra. Per ottenere questo dato, in ogni prova svolta, si è atteso che si instaurassero condizioni di moto stazionario con un livello costante a monte della paratoia.

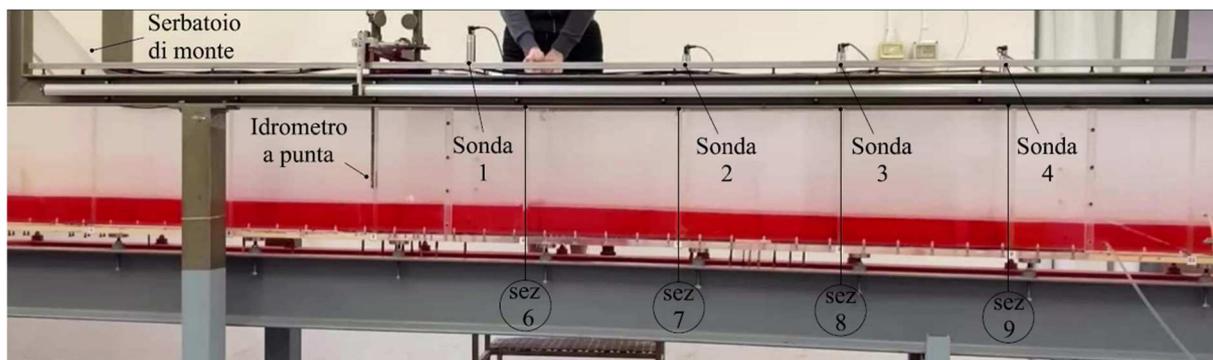


Figura 4. Strumenti utilizzati in laboratorio e la loro disposizione sulla canaletta.

Per produrre le diverse tipologie di onda doppia sono state impiegate tre dispositivi: una paratoia situata nella sezione 6 nella canaletta, che poteva essere abbassata o alzata grazie ad apposita gargamatura; una tavoletta in Plexiglass alta e larga quanto la canaletta e munita di un manico sul corpo per poterla sostenere e manovrare, indicata nel seguito come *pannello*, movimentato, sia singolarmente che in contemporanea agli altri dispositivi facendolo aderire ai bordi della canaletta in modo tale da causare meno perdite laterali possibili. Infine è stato utilizzato anche uno schermo permeabile, indicato nel seguito come *dispositivo poroso*, consistente in una griglia avente trama molto fitta per creare una perdita di carico in corrispondenza dell'apertura della paratoia.

3.2.2 Procedure sperimentali

Al fine di ottenere le configurazioni presenti in Figura 1 ed in Figura 3, sono state attuate diverse modalità esecutive, utilizzando la paratoia, il pannello ed il dispositivo poroso. Di seguito vengono riportate, per ogni tipologia di configurazione, tutte le modalità svolte per l'acquisizione dei dati di livello; in particolare, le procedure sperimentali vengono numerate in funzione del tipo di manovra eseguita: con la paratoia e/o con il pannello (da 1 a 4); del dispositivo poroso (5 e 6); con tutti e tre i dispositivi, numerando prima la procedura eseguita con la paratoia e/o il pannello poi quella con lo schermo poroso. Per ogni modalità, si tiene conto che viene fissata la pendenza della canaletta e le sonde sono calibrate a priori delle esecuzioni.

Per la configurazione di tipo A, si possono attuare quattro tipi diverse di procedure. La prima (procedura 5) consiste nel posizionamento di piedini (cioè, piccoli appoggi in plastica) nella gargamatura laterale della canaletta nella sezione 6 (Figura 4), in modo tale da poter fissare una apertura w_1 della paratoia, la quale viene inserita subito dopo. Si inserisce il dispositivo poroso, fino a farlo arrivare al fondo. Il passo successivo è quello di regolare opportunamente la portata e attendere che si instaurino condizioni di moto stazionario. Successivamente, mediante l'idrometro, viene misurato il tirante di monte Y_A . A questo punto, è possibile avviare la registrazione delle sonde ed alzare in maniera istantanea il dispositivo poroso. Una volta che entrambe le onde hanno attraversato l'intera canaletta, fino a sfociare nel serbatoio di raccolta dell'acqua di valle, la registrazione viene chiusa e salvata.

Per la seconda modalità (procedura 1.5) si parte da efflusso libero, posizionando la paratoia ad un'apertura iniziale w_0 , e si inserisce il dispositivo poroso fino al fondo della canaletta. Si impone un'apertura finale della paratoia pari a $w_1 < w_0$ aiutandosi con un sostegno posizionato sul fondo e di altezza pari all'apertura iniziale desiderata (che verrà tolto subito dopo). A questo punto si regola l'immissione della portata da monte in modo da ottenere un efflusso libero e, come per la modalità precedente, si attende che la corrente abbia raggiunto condizioni stazionarie. Si misura, tramite l'idrometro a punta, Y_A a monte della paratoia. Si avvia la

registrazione delle sonde poi, contemporaneamente ed istantaneamente, si abbassa la paratoia e si alza il dispositivo poroso. Una volta che la configurazione dei fronti d'onda ha attraversato tutta la canaletta, si ferma la registrazione e la si salva.

La terza modalità (procedura 4) consiste nei seguenti passi esecutivi. Per prima cosa si alza la paratoia a ventola di valle e si imposta la canaletta orizzontale; poi si immette una portata regolata da monte fino ad ottenere un determinato tirante Y_0 ; si prosegue inserendo la paratoia centrale alla canaletta in modo da bloccare il flusso d'acqua a valle; nel frattempo la portata deve continuare ad arrivare da monte fino a quando non si raggiunge un livello $Y_A > Y_0$; a questo punto si blocca il flusso. Una volta che il livello a valle e a monte è fermo, si misura il livello di monte Y_A tramite l'idrometro a punta. Infine, si fanno partire le registrazioni nel momento in cui la paratoia viene velocemente alzata. Le registrazioni si fermano nel momento in cui le onde vanno a sbattere contro la paratoia a ventola di valle.

La quarta ed ultima procedura sperimentale (procedura 3.5), consiste nell'utilizzo della paratoia, del pannello e del dispositivo poroso. Per prima cosa si posizionano i piedini nella gargamatura della canaletta in modo da fissare un'apertura w_1 e si inserisce la paratoia. Il pannello, poi, si posiziona su un sostegno, sistemato temporaneamente sul fondo, di altezza $w_0 < w_1$; il dispositivo poroso è posizionato tra le prime due in modo tale che arrivi fino a toccare il fondo del canale. Si invia una portata da monte tale che l'efflusso a valle della paratoia sia libero e si attende che la corrente giunga a regime stazionario e, dopo aver misurato il livello a monte della paratoia tramite l'idrometro, si avviano le sonde e si alzano contemporaneamente il pannello e il dispositivo poroso. Anche in questo caso si ferma la registrazione quando la configurazione avrà oltrepassato tutto il canale.

Si riporta a titolo di esempio un'immagine relativa alla configurazione di onde di tipo A ottenuta con una delle procedure spiegate.

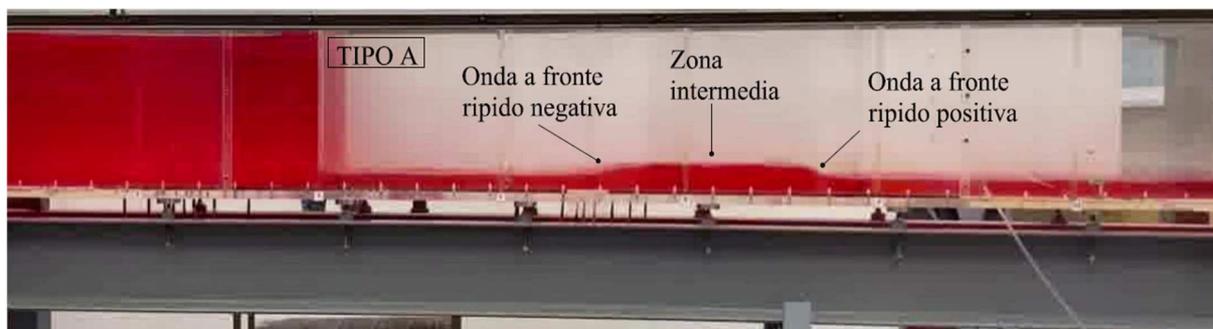


Figura 5. Configurazione di tipo A ottenuta in laboratorio il giorno 08/05/23 attraverso la procedura 5

Per ottenere configurazioni di tipo B, si adoperano due diverse modalità esecutive, di seguito elencate e spiegate. La prima modalità (procedura 3) prevede l'utilizzo della paratoia e del pannello. Per prima cosa, si posizionano i piedini di sostegno lateralmente alla canaletta, in modo da poter fissare un'apertura finale pari a w_1 ; si inserisce la paratoia fino a che questa non poggia sui piedini, poi si posiziona il pannello, subito a monte della paratoia, su un sostegno tale che l'apertura sia $w_0 < w_1$. Si immette la portata da monte e si attende che la corrente raggiunga condizioni di moto stazionario poi, tramite idrometro a punta, si misura il livello a monte delle paratoie. A questo punto è possibile far partire la registrazione delle sonde e rimuovere velocemente il pannello simulando in questo modo l'innalzamento istantaneo della paratoia. Una volta che la configurazione ha attraversato tutta la canaletta si ferma la registrazione.

La seconda modalità (procedura 3.5), che può essere impiegata anche per la riproduzione di onde di tipo A, consiste nell'utilizzo della paratoia, del pannello e del dispositivo poroso. Si posizionano i piedini nella gargamatura della canaletta in modo da fissare un'apertura w_1 e si inserisce la paratoia. Il pannello viene posizionato su un sostegno, sistemato temporaneamente sul fondo, di altezza $w_0 < w_1$; il dispositivo poroso viene sistemato tra le prima due in modo tale che arrivi fino a toccare il fondo del canale. La paratoia deve inizialmente toccare la corrente e la corrente in regime stazionario; dopo aver misurato il livello a monte della paratoia tramite l'idrometro, si avviano le sonde e si alzano contemporaneamente il pannello e il dispositivo poroso. Infine, si possono interrompere le registrazioni.



Figura 6. Configurazione di tipo B ottenuta in laboratorio il giorno 23/05/23 attraverso la procedura 3

Si discute ora delle quattro modalità di esecuzione per riprodurre la configurazione di tipo C. Si ribadisce che, per ogni modalità attuata, si imposta la pendenza del fondo del canale, così come la taratura delle sonde, prima dell'esecuzione. La prima modalità che si vuole riportare (procedura 2), consiste nel posizionamento dei piedini per poter fissare un'apertura pari a w_1 poi, si regola l'ingresso della portata da monte e si attende che si instaurino condizioni di moto stazionario con un tirante $Y_0 > w_1$. A questo punto si avviano le registrazioni delle sonde e si inserisce istantaneamente la paratoia facendola scorrere nella gargamatura, dove precedentemente sono stati inseriti i piedini. Infine, si chiudono le registrazioni.

La seconda modalità (procedura 1) consiste ancora nell'utilizzo della paratoia; dopo aver inserito i piedini per fissare l'apertura finale pari a w_1 si inserisce la paratoia posizionata ad un'altezza $w_0 > w_1$ aiutandosi, per questa operazione, con un sostegno posizionato temporaneamente sul fondo. Si immette una portata da monte, in modo tale che la paratoia inizialmente tocchi la corrente, si attende che vengano raggiunte condizioni di moto stazionario e si fa partire la registrazione delle sonde. A questo punto la paratoia viene rapidamente abbassata al livello w_1 . Una volta che entrambi i fronti sono giunti al serbatoio finale della canaletta, è possibile fermare la registrazione.

Nella terza modalità (procedura 1.6) si usufruisce della paratoia e del dispositivo poroso prestabilendo, tramite l'utilizzo di piedini, un'altezza finale dell'apertura pari a w_1 . La paratoia e il dispositivo poroso devono aderire l'uno all'altro e devono garantire un efflusso libero con apertura w_0 ; una volta regolata la portata in arrivo da monte ed avviate le registrazioni, vengono

abbassati contemporaneamente in maniera istantanea fino ad incontrare la paratoia rigida con i piedini di altezza w_1 ed il setto poroso con il fondo. A questo punto la registrazione può essere fermata.

Ci si avvale di un'ultima modalità esecutiva (procedura 2.6) per ottenere la configurazione di tipo C. Per questa procedura si utilizzano la paratoia e il dispositivo poroso che dovranno muoversi contemporaneamente. Per prima cosa si fissa un'apertura finale w_1 della paratoia poi, si regola la portata da monte. Si consideri che prima di effettuare la manovra, nessun dispositivo intercetta la corrente, la quale dovrà raggiungere il moto stazionario; si misura il tirante Y_A tramite l'idrometro a punta poi si avviano le registrazioni delle sonde. Il passo successivo è quello di abbassare istantaneamente la paratoia (fino a w_1) ed il dispositivo poroso (fino al fondo). Quando tutte le sonde avranno registrato il passato delle onde, si potranno spegnere le registrazioni.

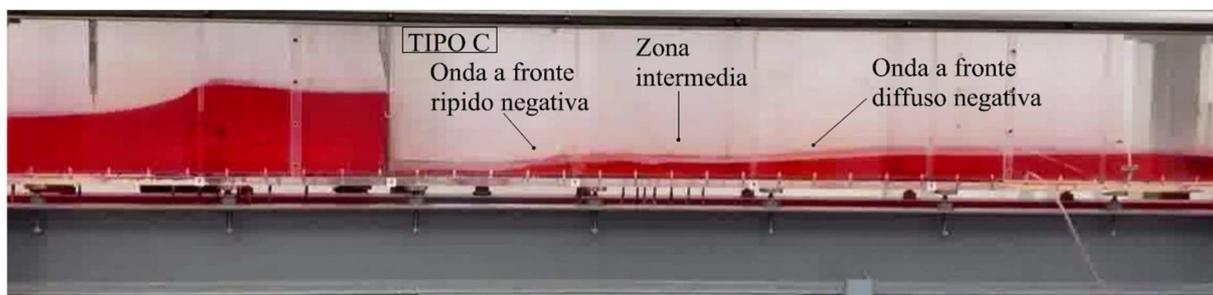


Figura 7. Configurazione di tipo C ottenuta in laboratorio il giorno 22/05/23 utilizzando la procedura 1.6

Si riporta le procedure esecutive seguite per ottenere una configurazione D. La prima modalità esecutiva (procedura 6) consiste nell'utilizzo della paratoia e del dispositivo poroso, la prima rimane fissa ad un'apertura w_1 dal fondo della canaletta mentre, il dispositivo poroso, non tocca inizialmente il livello dell'acqua. Viene immessa la portata regolata da monte e si attende il moto stazionario della corrente, dopodichè si avvia la registrazione delle sonde e si abbassa istantaneamente il dispositivo poroso fino in fondo. A questo punto nasce la configurazione che viaggerà da monte verso valle; solo quando questa avrà percorso tutto il canale, si potranno spegnere le registrazioni delle sonde.

Per la seconda modalità (procedura 1.6) si usufruisce della paratoia e del dispositivo poroso che dovranno essere movimentate contemporaneamente. Per prima cosa si inseriscono i piedini nella gargamatura della canaletta, in modo tale da fissare un'apertura w_1 ; si utilizza poi un sostegno posizionato temporaneamente sul fondo per impostare un'apertura iniziale della paratoia e del dispositivo poroso $w_0 > w_1$. Si regola la portata da monte in modo che l'efflusso sia libero e poi attente il moto stazionario della corrente; una volta misurato il tirante a monte della paratoia Y_A si abbassano istantaneamente sia la paratoia, fino a w_1 , che il dispositivo poroso fino al fondo.

L'ultima procedura attuata per la riproduzione delle onde di tipo D (procedura 3.6) prevede l'utilizzo della paratoia, del pannello e del dispositivo poroso. Per prima cosa si fissa un'apertura iniziale di tutti e tre i dispositivi $w_0 = w_1$; poi si regola la portata da monte in modo che questi tocchino la corrente e si attende il moto stazionario della stessa. Una volta misurato il tirante a monte della paratoia con l'idrometro a punta, si procede con alzare il pannello ed, in contemporanea, si abbassa il dispositivo poroso fino al fondo. Infine, le registrazioni delle sonde possono essere fermate e salvate.

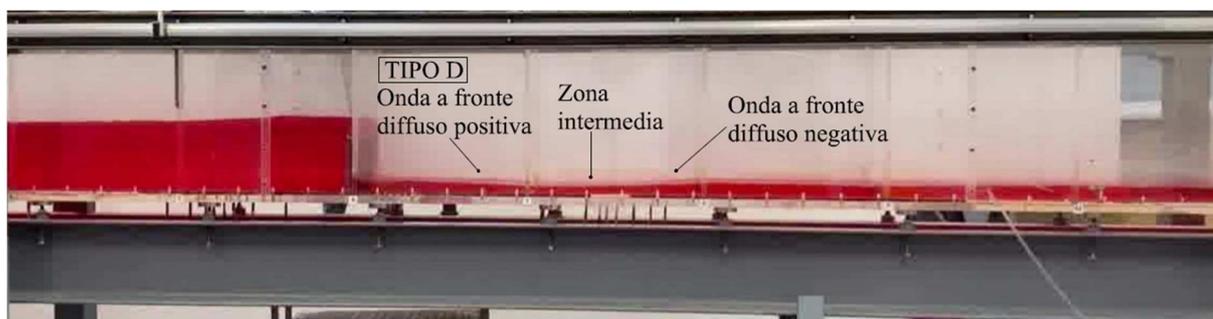


Figura 8. Configurazione di tipo D ottenuta in laboratorio il giorno 22/05/23 attraverso la procedura 6

Oltre alle quattro configurazioni di efflusso libero, si sono riprodotte anche quelle ad efflusso rigurgitato cioè, quelle di tipo Aw e di tipo Cw in Figura 3. Di seguito vengono elencate le procedure che sono state attuate per riprodurre anche questo tipo di configurazioni di onda singola.

Per ottenere la configurazione di tipo Aw, si procede tramite una modalità (procedura 4): per prima cosa si alza la paratoia a ventola di valle e si imposta la canaletta orizzontale; poi si immette una portata regolata da monte fino ad ottenere un tirante Y_0 ; si prosegue inserendo la paratoia centrale alla canaletta in modo da bloccare il flusso d'acqua a valle, nel frattempo la portata deve continuare ad arrivare da monte fino a quando non si raggiunge un livello $Y_A > Y_0$, a questo punto si blocca il flusso. Una volta che il livello a valle e a monte è fermo, si misura il livello di monte Y_A tramite l'idrometro a punta. Infine, si fanno partire le registrazioni e subito dopo la paratoia viene velocemente alzata. Le registrazioni si fermano nel momento in cui le onde vanno a sbattere contro la paratoia a ventola di valle. Di seguito si riporta un frame di esempio di onda di tipo Aw, ottenuta in laboratorio grazie all'impiego della procedura 4 appena spiegata

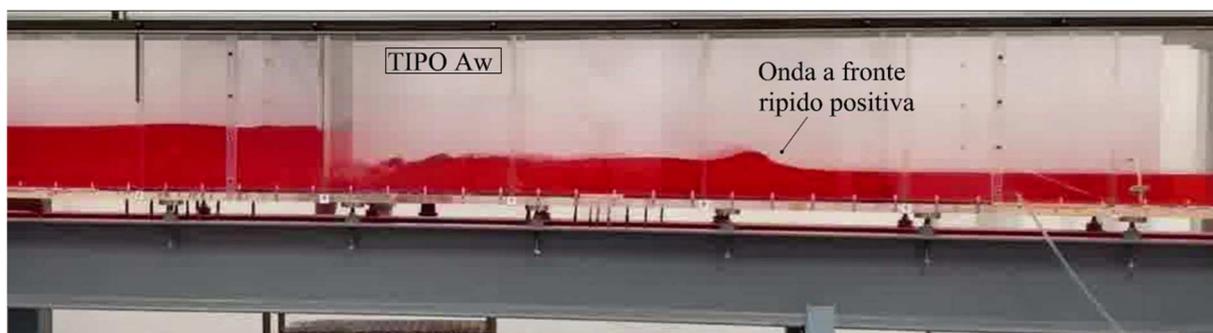


Figura 9. Configurazione di tipo A rigurgitato, ottenuta in laboratorio il giorno 10/05/23 attraverso la procedura sperimentale 4

L'ultima configurazione di cui si discute è quella di tipo Cw. Per ottenere questa configurazione si procede con la modalità già indicate come procedura 2. In questo caso si alza la paratoia a ventola di valle e si imposta la canaletta a bassa pendenza. Inizialmente, la paratoia non tocca la corrente e si posizionano i piedini nella gargamatura in modo da ottenere un'ampiezza finale w_1 . A questo punto, si regola una portata da monte in modo da ottenere un livello controllato Y_0 , e si attende il moto stazionario della corrente in arrivo. Si misura il livello Y_0 con l'idrometro a punta, poi si avviano le registrazioni delle sonde; si abbassa la paratoia in maniera istantanea e, dopo la formazione della configurazione, le registrazioni vengono fermate.



Figura 10. Configurazione di tipo C rigurgitato, ottenuta in laboratorio il giorno 22/06/23 attraverso la procedura sperimentale 2

Seguendo questi approcci, si sono ottenute un numero totale di prove pari a 91. Si riportano, nel capitolo successivo, i risultati ottenuti dalle sperimentazioni in laboratorio prima per le configurazioni di onda doppia poi, per le configurazioni di onda singola.

3.3 Risultati delle indagini sperimentali

In questo capitolo si riportano i risultati ottenuti in laboratorio relativi alle configurazioni sperimentali che sono state ricavate attraverso le procedure enunciate nel paragrafo 3.2.2. In questo capitolo si esaminano le prove riferite alle configurazioni di onda doppia cioè quelle di tipo A, tipo B, tipo C e tipo D (Figura 2) e quelle di onda singola Aw e Cw (Figura 3). Le condizioni imposte, i valori misurati e i risultati dell'applicazione del modello teorico sono raccolti in Appendice. In particolare, la velocità U_1 , imposta come condizione di monte nel modello teorico, non è stata misurata ma è stata stimata utilizzando le equazioni (22) in cui però si sono utilizzati i dati sperimentali ponendo $c_c w_1 = Y_1$ e trovando quindi

$$c_{q1} w_1 = \frac{c_c w_1}{\sqrt{1 + \frac{c_c w_1}{Y_B}}} = \frac{Y_1}{\sqrt{1 + \frac{Y_1}{Y_B}}} \quad (22)$$

$$q_1 = c_{q1} w_1 \sqrt{2gY_B}$$

$$U_1 = q_1/Y_1$$

Per ogni prova sono stati calcolati i numeri di Froude della corrente di valle e di monte al fine di disporsi all'interno dei campi di esistenza delle diverse configurazioni possibili, dunque per ogni caso esaminato, si sono ricavati i rispettivi valori di ascissa e ordinata $\Delta F/F_1$ e $F_0\sqrt{\mu}/F_1$. Tramite questa elaborazione è stato possibile collocare ciascuna condizione sperimentale ottenuta in laboratorio, classificandola all'interno del proprio dominio in Figura 11.

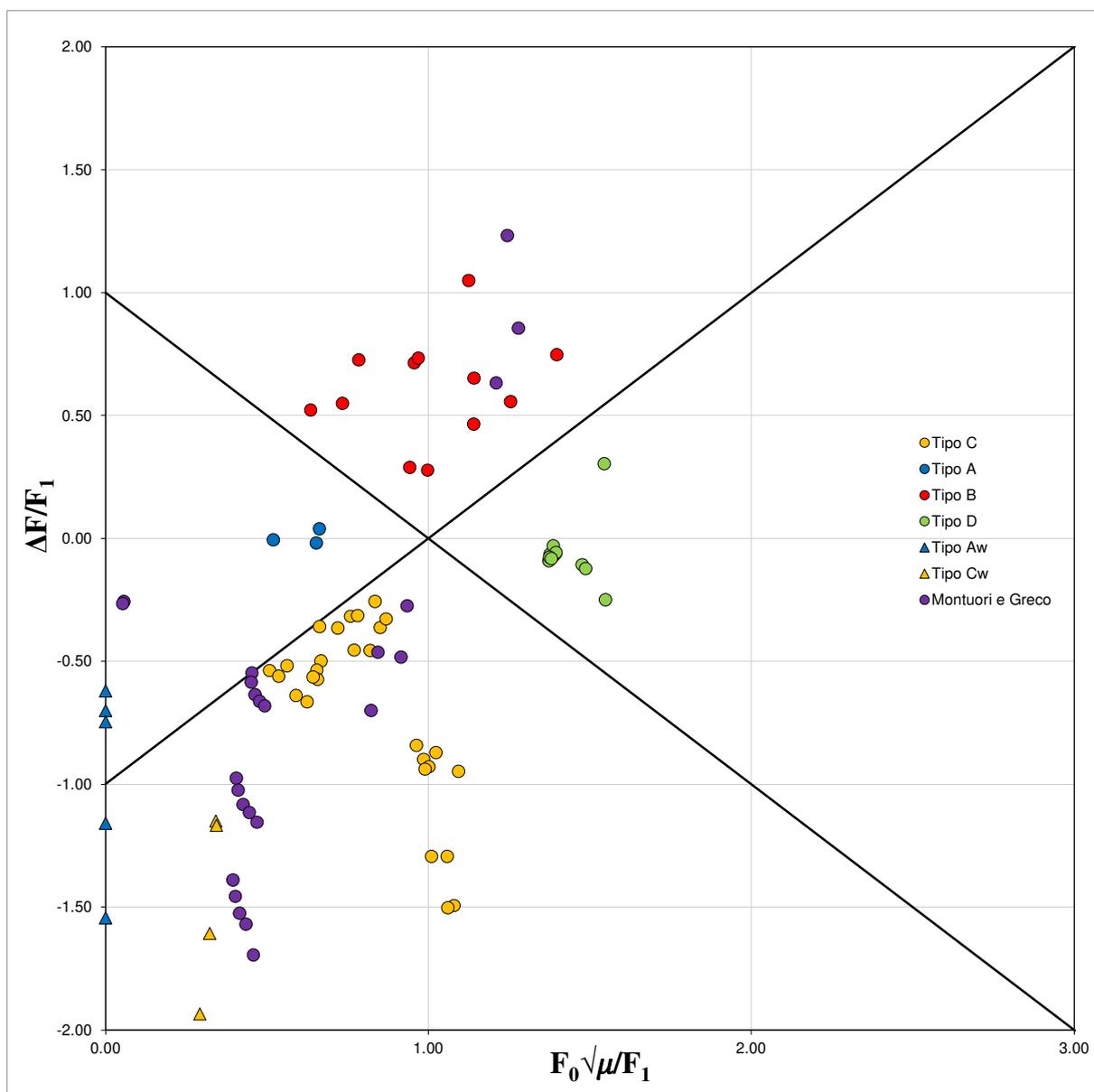


Figura 11. Condizioni sperimentali inserite nei rispettivi campi di esistenza delle varie configurazioni possibili

Sono stati ottenuti nuovi punti sperimentali in aggiunta a quelli ricavati da Montuori e Grego (1973). Osservando il dominio per le configurazioni di tipo C, si può notare come, tramite l'utilizzo della paratoia e del dispositivo poroso seguendo le procedure 1.6 e 2.6, è stato possibile trovare condizioni sperimentali adeguate a soddisfare la condizione per cui $U_0 > U_1$ e, quindi, $F_0\sqrt{\mu}/F_1 > 1$. Ponendo ora l'attenzione sul campo di esistenza corrispondente al tipo B, si mostra necessaria una condizione per cui $U_0 < U_1$ al fine di ottenere dei punti

sperimentali per $F_0\sqrt{\mu}/F_1 < 1$, questa è stata raggiunta grazie all'utilizzo del pannello e del dispositivo poroso seguendo la procedura sperimentale 3.5 e la procedura 3. Si osserva come anche per il campo di esistenza delle onde di tipo A, sono stati aggiunte diverse condizioni sperimentali che soddisfano l'esistenza di questa tipologia di configurazione; per farlo, ci si è serviti di tutte le procedure sperimentali spiegate nel paragrafo 3.2.2. Infine, è stato possibile ricavare un sostanziale numero di punti anche per configurazioni di tipo D, di tipo Aw e di tipo Cw; questo grazie agli strumenti ed alle modalità esecutive utilizzate durante la sperimentazione

Di seguito, in particolare, si riportano e si discutono i risultati sperimentali suddivisi per configurazione, tuttavia, prima di illustrare i risultati degli esperimenti si riporta di seguito la stima effettuata della resistenza prodotta dal dispositivo poroso.

3.3.1 Resistenza prodotta dal dispositivo poroso

Al fine di ottenere alcuni dei risultati sperimentali ci si è serviti del dispositivo poroso, questo comporta una perdita di carico localizzata a cavallo della sezione 6, cioè dove si crea la vena contratta. Per ricavare un coefficiente di dissipazione adeguato ad esprimere le perdite di carico si effettua un bilancio di energia in corrispondenza della paratoia e del dispositivo poroso, considerate nella medesima posizione, ricordando che la portata specifica q_0 si mantiene costante per continuità, si ottiene:

$$Y_A + \frac{q_0^2}{2gY_A^2} - \Delta E = w_0c_c + \frac{q_0^2}{2g(w_0c_c)^2} \quad (23)$$

Dove: Y_A è il tirante a monte della paratoia prima della manovra; c_c è il coefficiente di contrazione pari al rapporto tra il tirante della vena contratta a valle della paratoia e l'apertura della paratoia; w_0 cioè, l'apertura della paratoia rispetto il fondo.; ΔE rappresenta, invece, le dissipazioni di energia causate dalla presenza del dispositivo poroso. Ora si cerca di quantificare questo ultimo termine assumendo che sia proporzionale al dislivello tra il tirante a monte e a valle la paratoia, si ottiene:

$$\Delta E = \alpha(Y_A - w_0 c_c) w_0 c_c \quad (24)$$

Si sostituisce la (24) nella (23) e si ricava una formulazione per q_0 :

$$q_0 = c_q w_0 \sqrt{2gY_A} \quad (25)$$

In cui:

$$c_q = \frac{c_c}{\sqrt{1 + \frac{c_c w_0}{Y_A}}} \sqrt{1 - \alpha} \quad (26)$$

La perdita di carico ΔE può anche essere espressa come proporzionale al carico cinetico riferito alla vena contratta a valle della sezione 6:

$$\Delta E = k \frac{q_0^2}{2g(w_0 c_c)^2} \quad (27)$$

Anche in questo caso si sostituisce la formulazione delle perdite di carico (27) nell'equazione (23) e si esplicita:

$$q_0 = c_q w_0 \sqrt{2gY_A} \quad (28)$$

In cui:

$$c_q = \frac{c_c}{\sqrt{\frac{k}{1 - c_c w_0 / Y_A} + \frac{c_c w_0}{Y_A}}} \quad (29)$$

Queste due formulazioni possono essere messe in relazione considerando la (23), ponendo l'ipotesi di carico cinetico a monte trascurabile e sostituendo nel termine di dissipazione di energia la (27), dopo alcuni passaggi matematici, si ottiene:

$$\alpha = \frac{k}{1+k} \quad (30)$$

Quindi, per alcune prove sperimentali eseguite servendosi del dispositivo poroso, è stato calcolato il coefficiente c_{qi} , tramite la (25), per poi utilizzare la formula (26) per esplicitare α_i . Una volta calcolati i coefficienti α_i per ognuno degli esperimenti, è stato possibile ricavare un coefficiente medio tra questi pari a $\alpha = 0.629$.

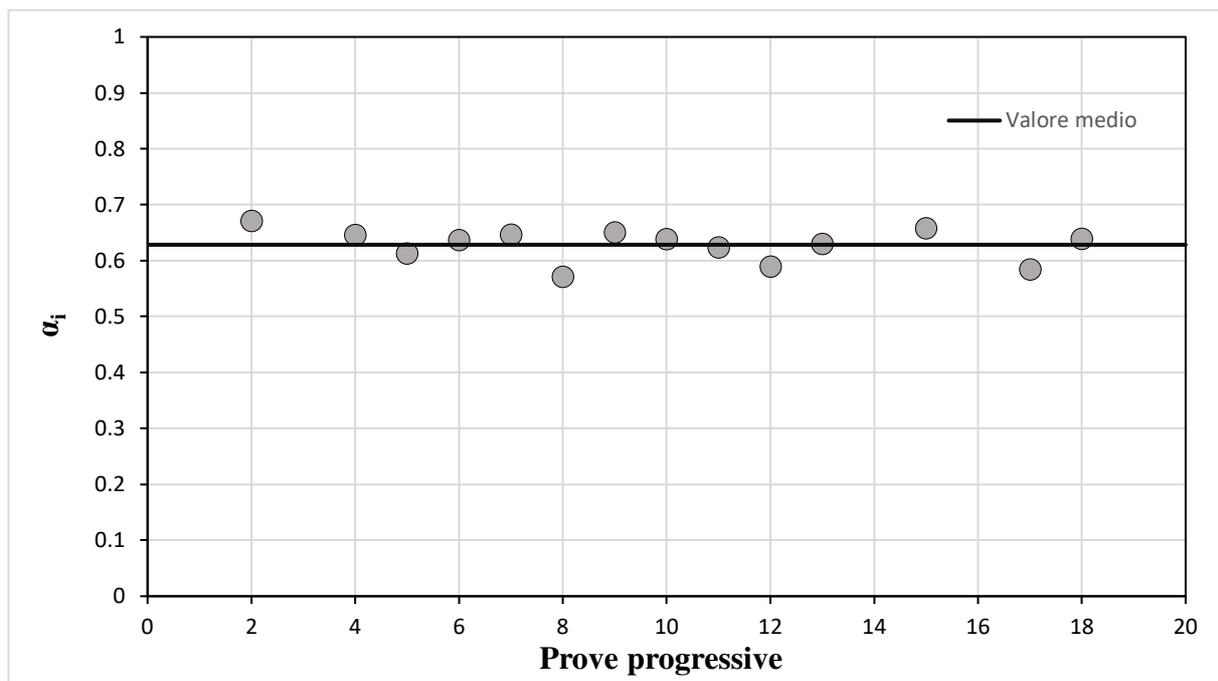


Figura. 12 Coefficienti α calcolati per 14 prove (che prevedessero l'utilizzo del dispositivo poroso) e la loro media.

Nel modello è stato utilizzato un valore approssimato di $\alpha = 0.60$; per ogni prova elaborata nel modello, questo valore di α è stato inserito nella (26) per calcolare il coefficiente c_{q1} riferito

alla corrente immessa da monte, per poi utilizzare la (25) per calcolare la portata specifica q_1 ($\frac{m^3}{ms}$). A questo punto la velocità della stessa corrente è stata calcolata come $U_1 = q_1/Y_1$ con la quale è stato possibile ricavare il numero di Froude di monte (F_1).

Il coefficiente è stato implementato quando le procedure di elaborazione richiedevano l'utilizzo del dispositivo poroso per esprimere le perdite di carico dovute allo stesso. Quando le modalità di riproduzione delle configurazioni non prevedevano l'utilizzo del dispositivo e, quindi, la presenza di una perdita di carico puntuale, si è considerato $\alpha = 0$,

Si analizzano di seguito i risultati ottenuti per ciascuna tipologia di configurazione di onde.

3.3.2 Onda di tipo A

Come già enunciato nel paragrafo 3.2.2, per ottenere sperimentalmente le onde di tipo A sono state impiegate quattro diverse procedure: procedura 5, procedura 4 e procedura 1.5 e procedura 3.5. In questo paragrafo, si riportano alcuni esempi di risultati ottenuti dall'impiego delle singole procedure.

In particolare, si mettono a confronto le configurazioni di onde sperimentali, ottenute dalla misurazione delle sonde, con le curve teoriche, ricavate dal modello. L'istante in cui la manovra viene effettuata è segnalato tramite una retta rossa; da questo istante in poi sono riportate le onde di valle alla paratoia.

In Figura. 13 sono individuate le onde derivanti dalla misurazione delle sonde, tramite linea continua, e quelle risultanti dal modello teorico utilizzato, tramite linea tratteggiata. Si osserva che, nel complesso, il modello teorico approssima abbastanza bene quello sperimentale.

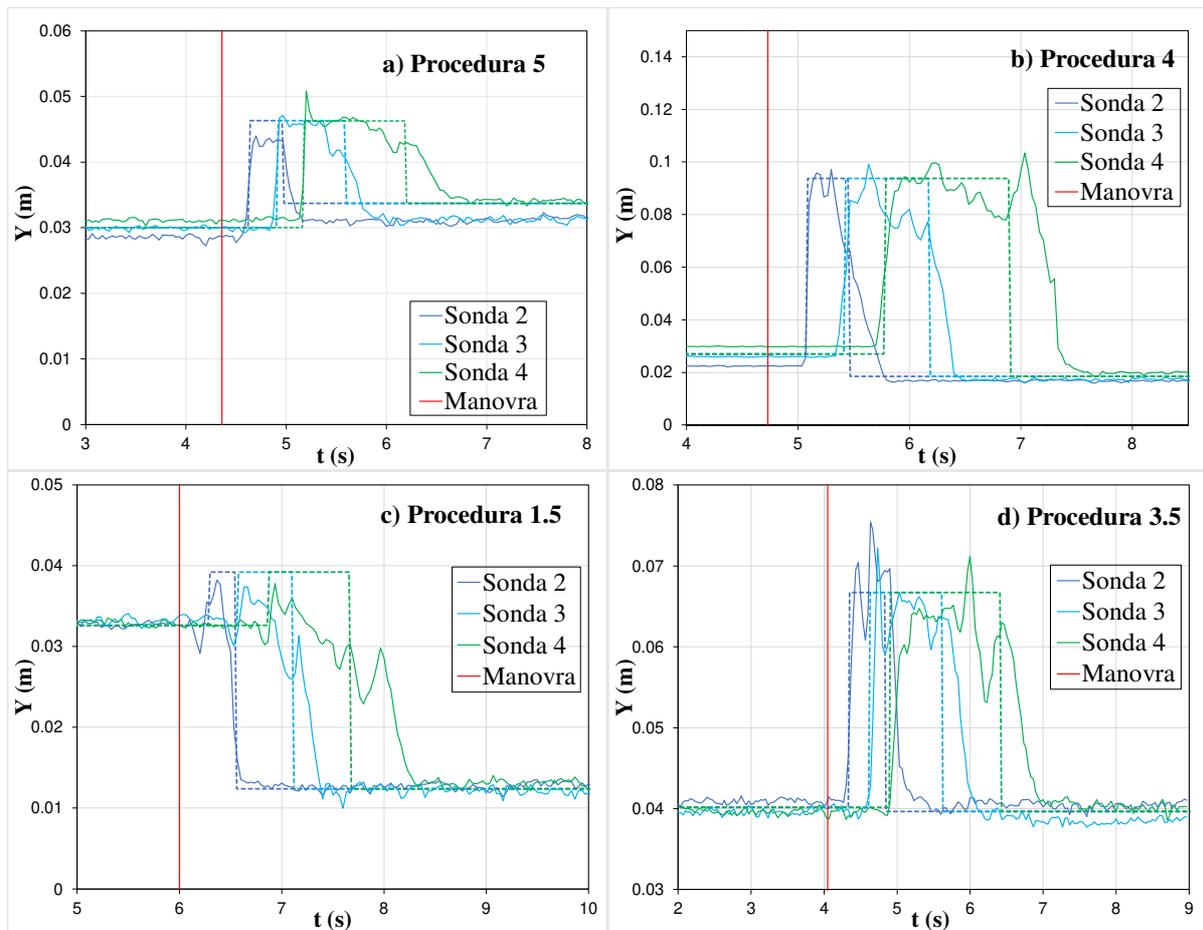


Figura. 13 Confronto onde sperimentali con quelle teoriche per le quattro procedure possibili.

Si osserva come in tutti i casi, man mano che la configurazione di due onde si propaga nel tempo, il modello teorico non approssima molto bene la lunghezza della zona intermedia che, nelle misure delle sonde 3 e 4, è più amplificata rispetto la previsione della teoria; il modello, inoltre, calcola con buona approssimazione il tirante nella zona intermedia che, infatti, si osserva essere pari ad un tirante medio rispetto i tiranti misurati dalle sonde nella stessa zona, la quale risulta essere affetta da qualche oscillazione sulla superficie libera.

Risulta interessante riportare qualche considerazione sulla corrispondenza tra i parametri ottenuti dal modello teorico con quelli misurati sperimentalmente; vengono di seguito riportate alcune considerazioni sui livelli nella zona intermedia (Y_2), sulla celerità dell'onda di monte (a_m) e sulla celerità dell'onda di valle (a_v).

Partendo dai livelli intermedi, per ogni caso sperimentale, si è calcolato il rapporto Y_2/Y_0 utilizzando sia il tirante intermedio misurato sperimentalmente che, quello risultante dal modello; in questo modo, è stato possibile ricavare il seguente grafico di confronto con in ascissa il rapporto tra i tiranti misurati e, in ordinata, il rapporto teorico.

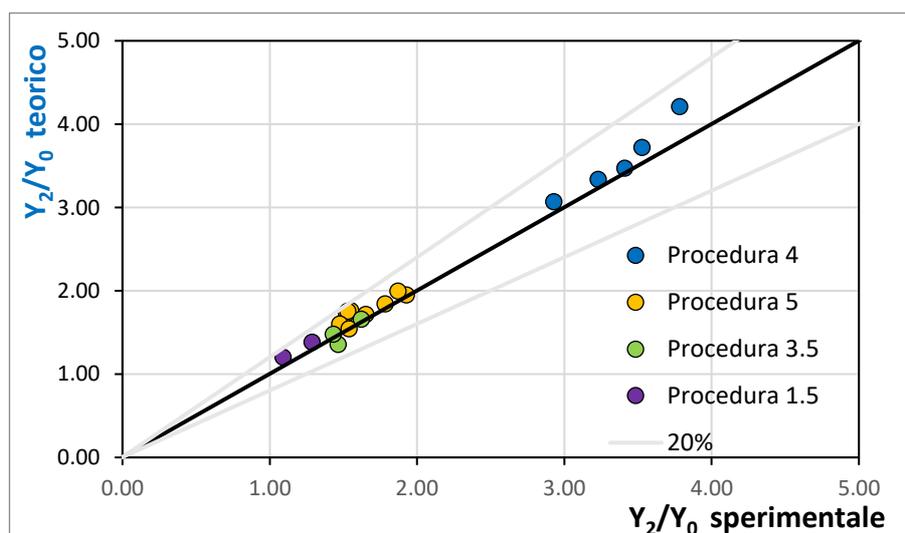


Figura. 14 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Dalla Figura. 14 si osserva come, tramite tutte le procedure, il valore del rapporto Y_2/Y_0 teorico risulta essere molto simile a quello sperimentale, infatti, tutti i punti riportati tendono a disporsi a ridosso della retta inclinata a 45° (perfect agreement). Ammettendo un errore del $\pm 20\%$, la differenza tra i risultati calcolati e misurati risulta rimanere sempre all'interno di questo intervallo e, quindi, può essere considerata trascurabile. Valutando la disposizione dei punti nel grafico, quelli relativi alle procedure 4 e 5 risultano, anche se non troppo, maggiormente dispersi rispetto i punti ottenuti con la procedura 3.5 e la procedura 1.5.

Volendo effettuare qualche considerazione sulla celerità, per poter confrontare i risultati derivanti dal modello, si è reso necessario misurare la celerità valutando il tempo necessario al fronte d'onda per percorrere la distanza tra una sonda ed un'altra. La celerità misurata e

calcolata, per ogni prova, viene scalata con la celerità relativa della corrente indisturbata, $c_0 = \sqrt{gY_0}$; si ottiene in questo modo, come per il tirante intermedio, una disposizione di punti attorno ad una retta inclinata a 45° . Nel seguente grafico, in ascissa si riportano i rapporti sperimentali mentre, in ordinata, i risultati teorici.

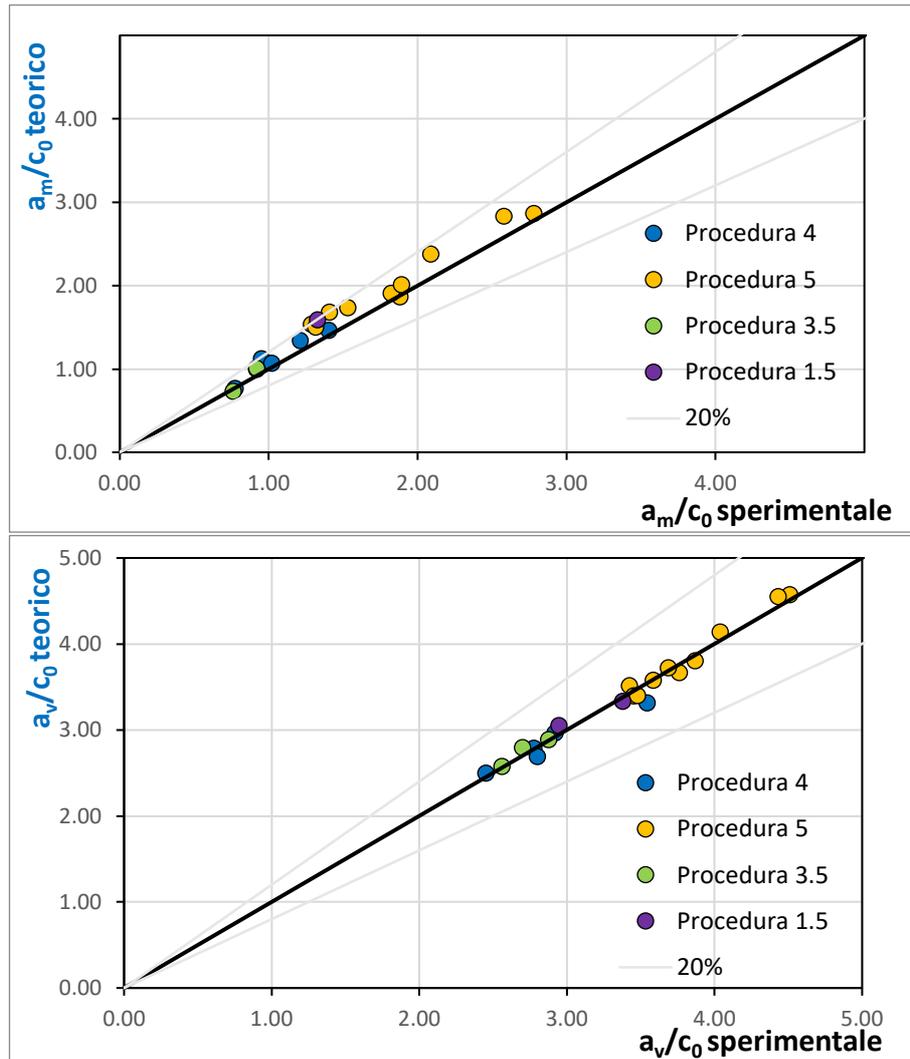


Figura. 15 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di monte (in alto) e dell'onda di valle (in basso) scalate con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

In generale, si osserva dalla Figura. 15, che i punti della celerità di valle tendono a disporsi, attorno alla retta, più in alto rispetto a quelli della celerità dell'onda di monte la quale, nelle prove sperimentali effettuate, è sempre più bassa rispetto la prima. In questo caso i valori di

celerità derivati dal modello teorico si discostano in maniera trascurabile rispetto quelli misurati, infatti, tutti i punti si dispongono entro il $\pm 20\%$ dalla retta a 45° . È interessante osservare in Figura. 13 che il modello anticipa l'arrivo del fronte ondoso di monte rispetto le misure sperimentali, quindi, la teoria sovrastima la celerità dell'onda di monte rispetto ai risultati di laboratorio, questo è visibile anche dalla Figura. 15, in cui, come previsto, i punti si dispongono sopra la retta di perfect agreement, rimanendo comunque all'interno di un intervallo accettabile.

Dunque, con tutte le procedure attuate, il modello teorico risulta essere adeguato ad esprimere la celerità delle due onde.

3.3.3 Onda di tipo B

Al fine di ottenere in modo sperimentale le onde di tipo B, si può procedere attraverso due procedure enunciate e spiegate nel paragrafo 3.2.2, cioè: procedura 3 e procedura 3.5. Nel seguente paragrafo si riportano alcuni esempi grafici di risultati ottenuti attraverso il loro impiego.

Per prima cosa, come per le onde di tipo A, si mettono a confronto le onde ottenute sperimentalmente, dalle misure delle sonde, con quelle ottenute dal modello teorico. Anche in questo caso l'istante in cui ha inizio la manovra, in Figura. 16, si segnala con una retta rossa all'interno del grafico mentre, le curve sperimentali e teoriche vengono differenziate dal tipo di linea utilizzata: tratteggiata per le onde teoriche e continua per le onde misurate.

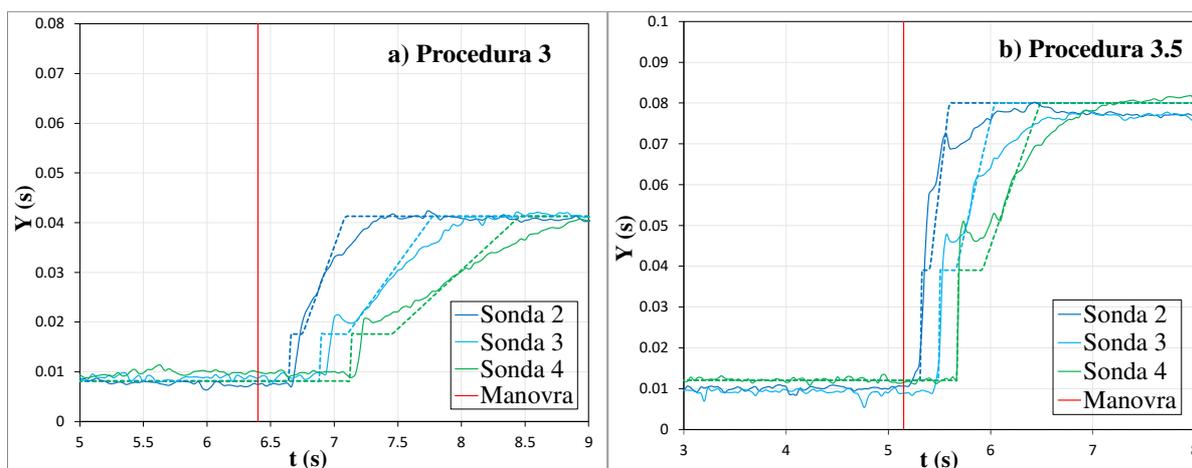


Figura. 16 Confronto onde sperimentali di tipo B con quelle teoriche per le quattro procedure possibili.

Dalla precedente figura si può osservare come, in generale, il modello teorico riesca ad approssimare adeguatamente l'intera configurazione. Si pone l'attenzione sul fatto che il tirante nella zona intermedia Y_2 , risultante dal modello, approssima mediamente quello misurato in laboratorio, il quale mostra una variazione decrescente dalla sonda 2 alla sonda 4.

Si riporta qualche considerazione sulla corrispondenza tra i parametri ottenuti, dal modello teorico, con quelli sperimentali, per entrambe le procedure possibili per la configurazione di tipo B. Si valutano nel dettaglio, i risultati ottenuti per i tiranti nella zona intermedia Y_2 , per la celerità dell'onda di valle a_v , e per la celerità dell'onda di monte a_m .

Iniziando dall'elaborazione dei tiranti nella zona intermedia, si riporta, per ogni caso sperimentale, il rapporto Y_2/Y_0 ponendo, come tirante al numeratore, sia quello calcolato dal modello che quello misurato dalle sonde. Si ottiene un grafico in cui a ogni prova corrisponde un punto di coordinate $(\frac{Y_2}{Y_0} \text{ sperimentale}; \frac{Y_2}{Y_0} \text{ teorico})$; questo viene di seguito riportato.

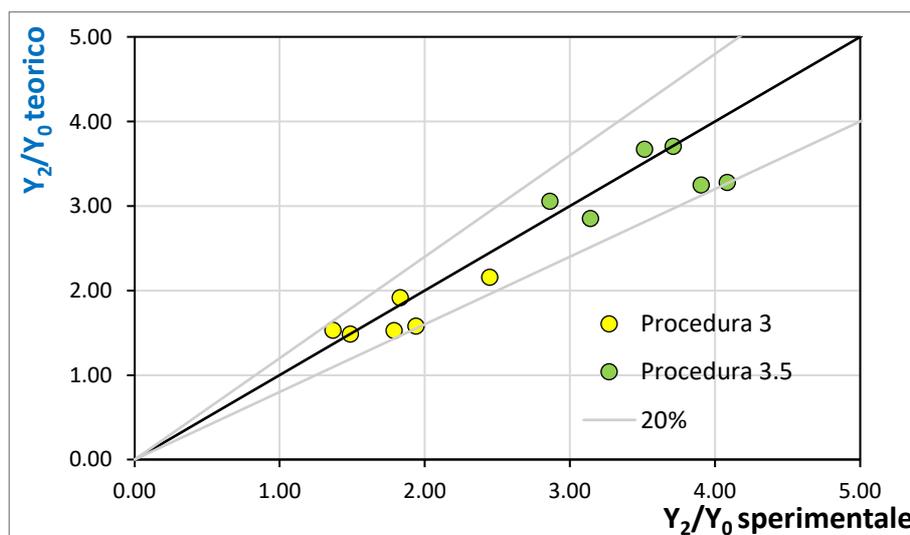


Figura. 17 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Come si osserva dalla Figura. 17, molti dei punti tendono a disporsi piuttosto a destra rispetto la retta a 45° , ciò sta a significare che il modello teorico tende a sottostimare il tirante nella zona intermedia sia con la procedura 3 che con la procedura 3.5; questa osservazione è concorde alla Figura. 16, in cui è evidente che il tirante intermedio teorico, in entrambi i casi; è più basso rispetto quello sperimentale. Come nel caso delle onde di tipo A, anche per le onde di tipo B, si può constatare un criterio di bontà dei dati, considerando un errore accettabile massimo pari a $\pm 20\%$; in questo intervallo ricadono tutti i punti presenti nel grafico.

Si procede con qualche considerazione sulla celerità, per fare questo è necessario misurare la celerità valutando il tempo necessario al fronte d'onda per percorrere la distanza tra una sonda ed un'altra. Essendo l'onda di monte a fronte diffuso, la sua celerità è calcolata dal modello come una media tra la celerità del piede e della cresta del fronte ondoso. La celerità misurata e calcolata, per ogni prova, viene scalata con la celerità relativa della corrente indisturbata, $c_0 = \sqrt{gY_0}$; si ottiene in questo modo, come per il tirante intermedio, una disposizione di punti attorno ad una retta inclinata a 45° (perfect agreement), in ascissa si riportano i rapporti sperimentali mentre, in ordinata, i risultati teorici.

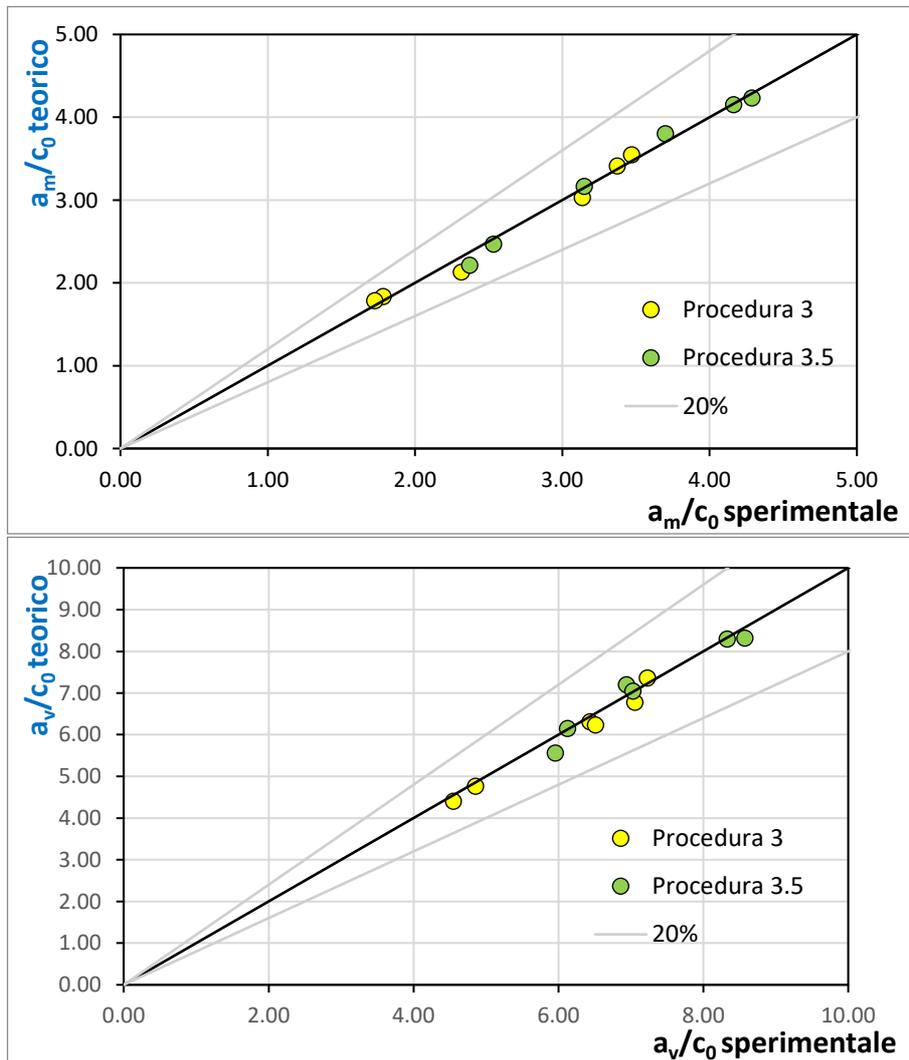


Figura. 18 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di monte (in alto) e dell'onda di valle (in basso) scalate con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

Facendo riferimento alla Figura. 18, si può constatare che il modello teorico approssima adeguatamente sia la celerità dell'onda di monte che la celerità dell'onda di valle, infatti, tutti i punti rimangono piuttosto vicini alla retta, a meno di qualche punto corrispondente ad una differenza tra celerità teorica e sperimentale trascurabile. Partendo dal grafico riguardante la celerità di monte, si osserva che i punti si posizionano in prossimità della retta, sia a sinistra che a destra di questa, ciò significa che tendenzialmente la teoria approssima bene la celerità misurata, talvolta viene sottostimata o sovrastimata in maniera del tutto trascurabile. Per quanto

riguarda la celerità dell'onda di valle, si ha che i punti tendono a disporsi in maniera omogenea attorno alla retta di 'perfect agreement', con errori trascurabili sia tramite la procedura 3 che con la procedura 3.5. Queste considerazioni sono confermate dalla Figura. 16, in cui vediamo che entrambi i fronti teorici tendono ad arrivare da una sonda all'altra, nello stesso momento dei fronti sperimentali.

3.3.4 Onda di tipo C

Come già enunciato nel paragrafo 3.2.2, per ottenere sperimentalmente le onde di tipo C sono state impiegate quattro diverse procedure: procedura 2, procedura 1, procedura 1.6 e procedura 2.6. Si riportano alcuni esempi di risultati ottenuti dall'impiego delle singole procedure.

In particolare, si mettono a confronto le configurazioni di onde sperimentali, ottenute dalla misurazione delle sonde, con le curve teoriche, ricavate dal modello. L'istante in cui la manovra viene effettuata è rappresentato da una retta rossa; da questo istante in poi sono riportate le onde di valle alla paratoia.

In Figura. 19 sono individuate le onde derivanti dalla misurazione delle sonde, tramite linea continua, e quelle risultanti dal modello teorico utilizzato, tramite linea tratteggiata. Si può affermare che, nel complesso, il modello teorico approssima abbastanza bene quello sperimentale, tuttavia, la prima differenza che si osserva, dall'impiego delle procedure 1 e 2, è quella tra il tirante calcolato e quello misurato, nella zona intermedia; la curva teorica, messa a confronto con quella sperimentale, tende a sovrastimare il tirante Y_2 . Una seconda osservazione viene fatta sull'onda di monte della configurazione: il fronte ondoso teorico (tratteggiato) non coincide particolarmente bene con quello sperimentale, in particolare, nei casi di procedura 2 e procedura 2.6.

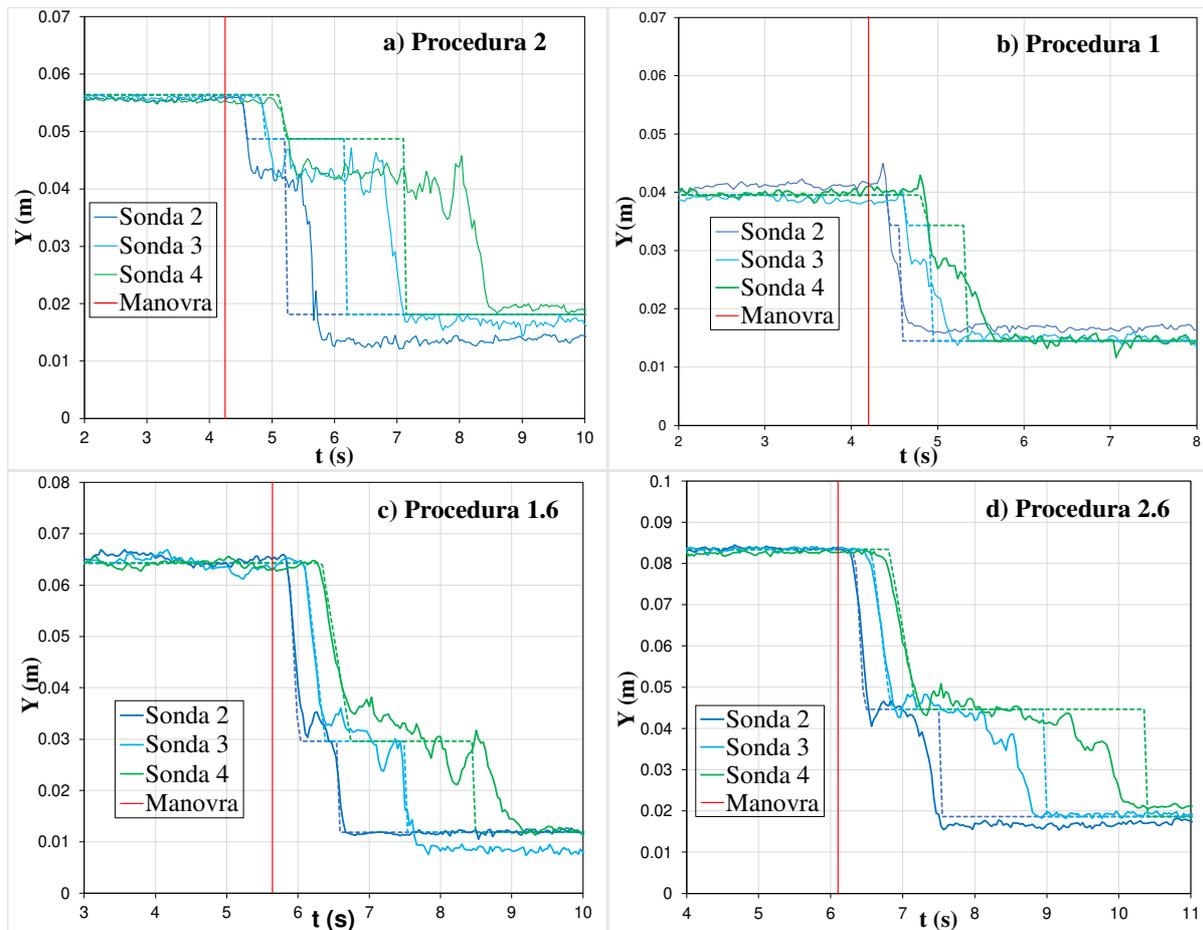


Figura. 19 Confronto onde sperimentali di tipo C con quelle teoriche per le quattro procedure possibili.

Risulta interessante riportare qualche considerazione sulla corrispondenza tra i parametri ottenuti dal modello teorico con quelli misurati sperimentalmente; in particolare, vengono di seguito riportate alcune considerazioni sui livelli nella zona intermedia (Y_2), sulla celerità dell'onda di monte (a_m) e sulla celerità dell'onda di valle (a_v).

Partendo dai livelli intermedi, per ogni caso sperimentale, si è calcolato il rapporto Y_2/Y_0 utilizzando sia il tirante intermedio misurato sperimentalmente che, quello dato dal modello; in questo modo, è stato possibile ricavare il seguente grafico di confronto avente, in ascissa, il rapporto tra i tiranti misurati e, in ordinata, il rapporto tra i tiranti teorici. I punti si disporranno lungo la retta inclinata a 45° se i risultati teorici e sperimentali coincideranno mentre, si discosteranno da questa man mano che la differenza tra questi, quindi l'errore, aumenterà.

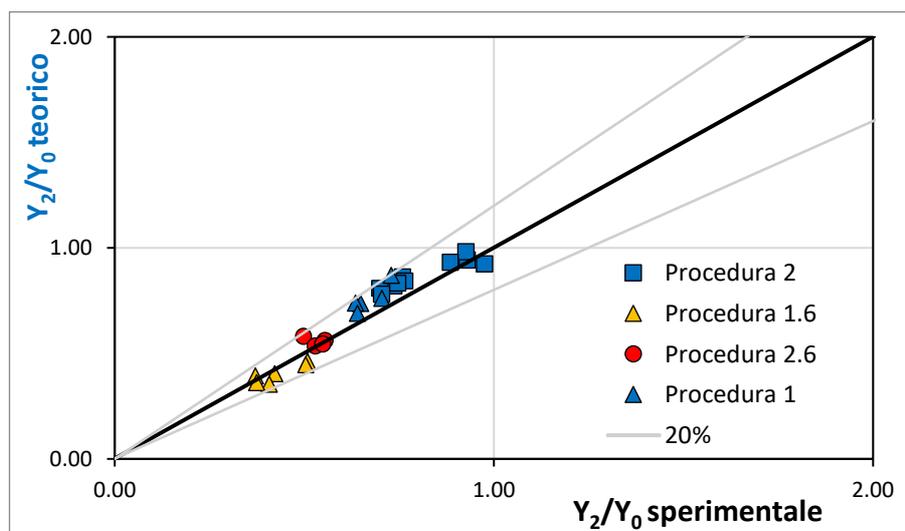


Figura. 20 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione d'onde di tipo C, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Si osserva, in Figura. 20, che il tirante nella zona intermedia calcolato con il modello teorico risulta essere sovrastimato rispetto quello ricavato tramite la procedura 2 e la procedura 1; con la procedura 2.6, il livello nella zona intermedia approssima meglio quello misurato sperimentalmente e i punti, riferiti ad ogni prova effettuata, si dispongono in corrispondenza della retta; mentre, si osserva che i punti riferiti alla procedura 1.6, si trovano perlopiù, appena sotto la retta a 45°, quindi il modello teorico tende a sottostimare il tirante effettivamente misurato. Tutte le prove riportate nel grafico rimangono all'interno di un intervallo in cui il massimo errore accettabile è pari al $\pm 20\%$. Queste considerazioni trovano corrispondenza con gli esempi riportati sopra, in cui nella Figura. 19.a e nella Figura. 19.b, si osserva un evidente distacco tra il tirante intermedio teorico e quello sperimentale mentre, nella Figura. 19.c e nella Figura. 19.d, la differenza tra i due è minima.

Viene fatta qualche considerazione sulla celerità anche per questa tipologia di configurazione d'onde, per fare questo è necessario misurare la celerità valutando il tempo necessario al fronte d'onda per percorrere la distanza tra una sonda ed un'altra. Essendo l'onda di valle a fronte diffuso, la sua celerità è calcolata dal modello come una media tra la celerità del piede e della cresta del fronte ondos. La celerità misurata e calcolata, per ogni prova, viene scalata con la

celerità relativa della corrente indisturbata, $c_0 = \sqrt{gY_0}$; si ottiene in questo modo, come per il tirante intermedio, una disposizione di punti attorno ad una retta inclinata a 45° (perfect agreement), in ascissa si riportano i rapporti sperimentali mentre, in ordinata, i risultati teorici.

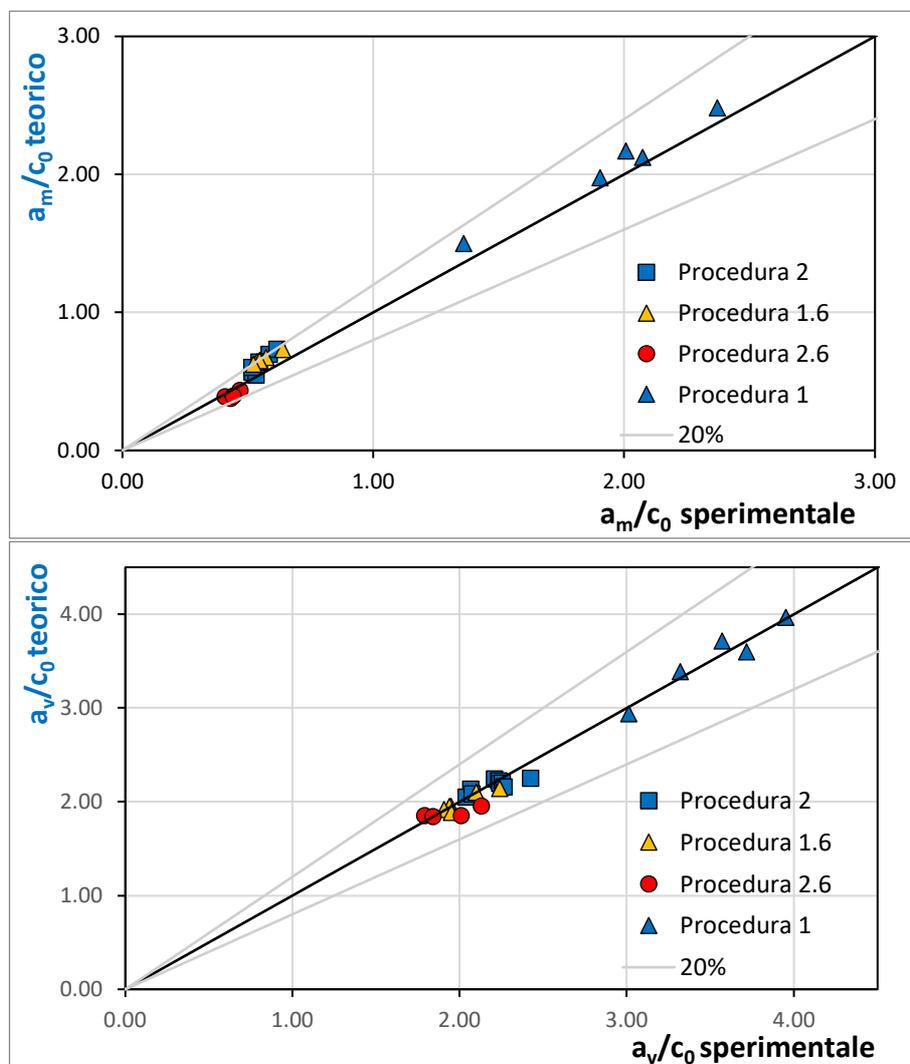


Figura. 21 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di monte (in alto) e dell'onda di valle (in basso) scalate con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

Si osserva come la celerità di monte, calcolata dal modello teorico, viene sovrastimata rispetto la celerità che risulta dall'impiego delle procedure 1, 2, e 1.6, infatti, i punti riferiti al confronto dei risultati di queste procedure sperimentali si posizionano sopra la retta di perfect agreement; al contrario, la celerità dell'onda di monte, viene sottostimata rispetto quella misurata dalle

configurazioni ottenute grazie alla procedura 2.6, i cui punti si dispongono sotto la retta a 45° . Per quanto riguarda il secondo grafico in Figura. 21, si ha che la celerità dell'onda di valle, calcolata con il modello teorico, approssima adeguatamente quella misurata; i punti si dispongono a ridosso della retta, in maniera omogenea, per tutte le procedure. Come per il tirante intermedio, anche per le celerità, si considerano accettabili gli errori, tra i tiranti teorici e sperimentali, non superiori al 20%. Anche questa osservazione trova un riscontro positivo con la Figura. 19, in cui si osserva che, per le procedure 1, 2 e 1.6, il fronte ondoso di monte teorico è anticipato rispetto quello sperimentale, diversamente per la procedura 2.6 in cui, il fronte teorico di monte è temporalmente posticipato rispetto quello misurato dalle sonde. Per quanto riguarda le celerità di valle, in tutti i casi esaminati, le onde teoriche e sperimentali trovano corrispondenza temporale.

3.3.5 Onda di tipo D

Al fine di ottenere in modo sperimentale le onde di tipo D, si può procedere attraverso tre procedure enunciate e spiegate nel paragrafo 3.2.2, cioè: procedura 6, procedura 1.6 e procedura 3.6. Nel seguente paragrafo si riportano alcuni esempi grafici di risultati ottenuti attraverso il loro impiego.

Per prima cosa, si mettono a confronto le onde ottenute sperimentalmente, dalle misure delle sonde, con quelle ottenute dal modello teorico. Anche in questo caso l'istante in cui ha inizio la manovra, in Figura. 22, si segnala con una retta rossa e le curve sperimentali e teoriche vengono differenziate dal tipo di linea utilizzata: tratteggiata per le onde teoriche e continua per le onde misurate.

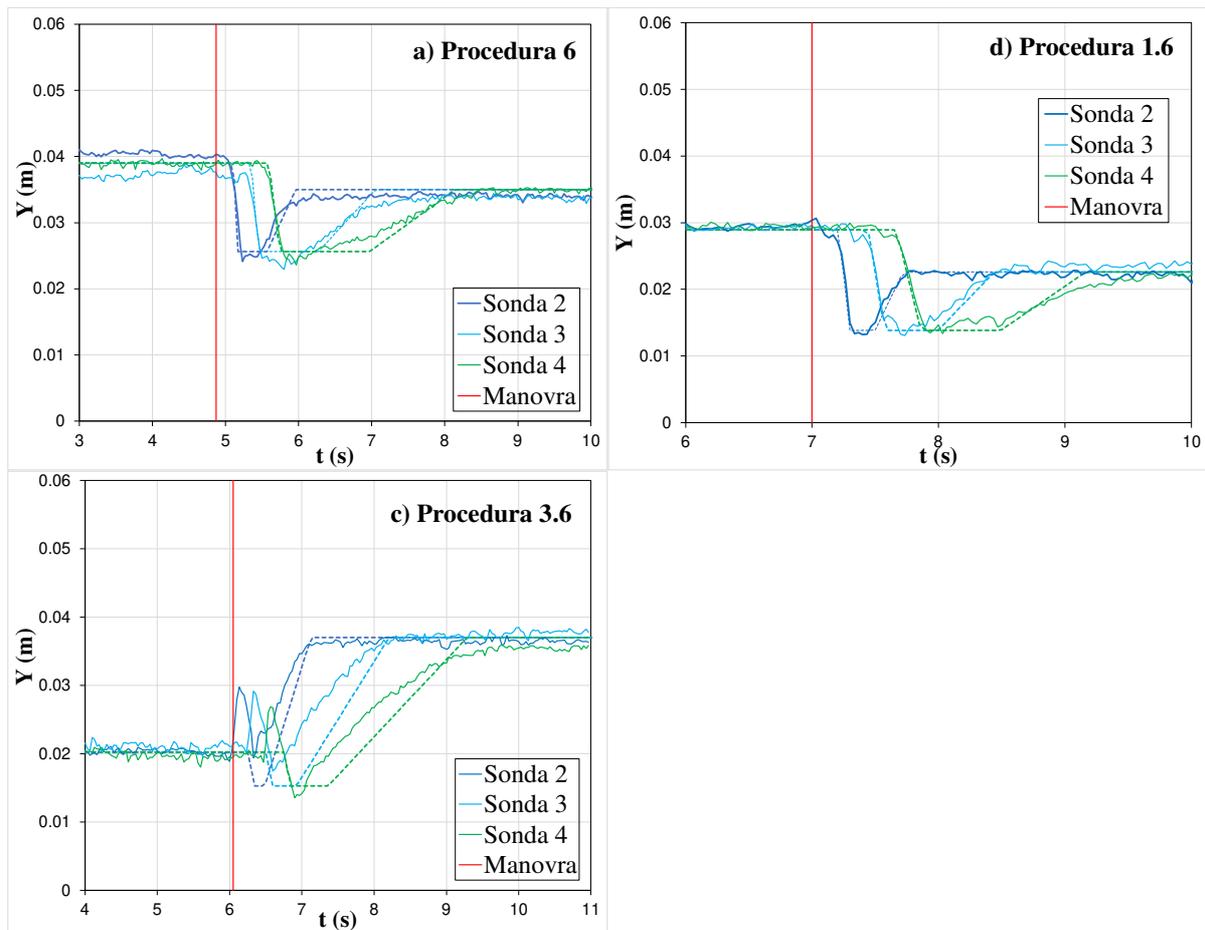


Figura. 22 Confronto onde sperimentali di tipo D con quelle teoriche per le quattro procedure possibili.

Si osserva che per le procedure 6 e 1.6, la curva teorica approssima adeguatamente la curva sperimentale mentre, per la procedura 3.6, le due curve risultano avere differenze evidenti, in particolare, la curva sperimentale ha un disturbo in corrispondenza dell'istante subito successivo alla manovra che comporta un innalzamento istantaneo del livello, tuttavia, questo fenomeno non è previsto dalla teoria. Quindi, l'altezza d'onda di valle, stimata con il modello, risulta essere nettamente inferiore rispetto quella misurata.

Al fine di valutare la bontà relativa alla corrispondenza tra la teoria implementata e i risultati sperimentali, alcuni dei parametri fondamentali sono stati elaborati e studiati; per questo motivo, vengono di seguito riportate alcune considerazioni sui livelli nella zona intermedia (Y_2), sulla celerità dell'onda di monte (a_m) e sulla celerità dell'onda di valle (a_v).

Per prima cosa si vuole effettuare qualche osservazione sui livelli nella zona intermedia, per ogni caso sperimentale, si è calcolato il rapporto Y_2/Y_0 utilizzando sia il tirante intermedio misurato sperimentalmente che, quello risultante dal modello; in questo modo, è stato possibile ricavare il seguente grafico di confronto con in ascissa il rapporto tra i tiranti misurati e, in ordinata, il rapporto teorico. Come nei paragrafi precedenti, se i due rapporti coincidono i punti, all'interno del grafico, si dispongono sopra la retta inclinata di 45° , altrimenti, questi si allontanano dalla stessa.

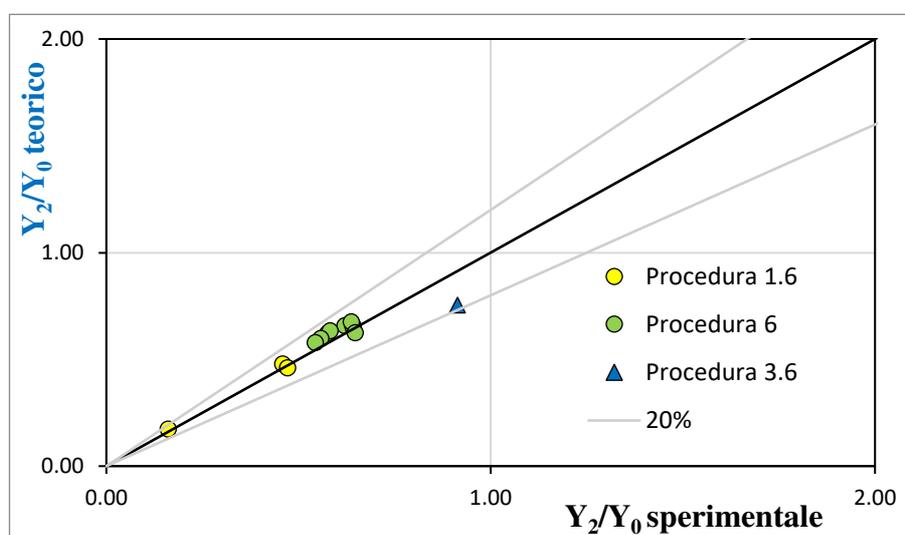
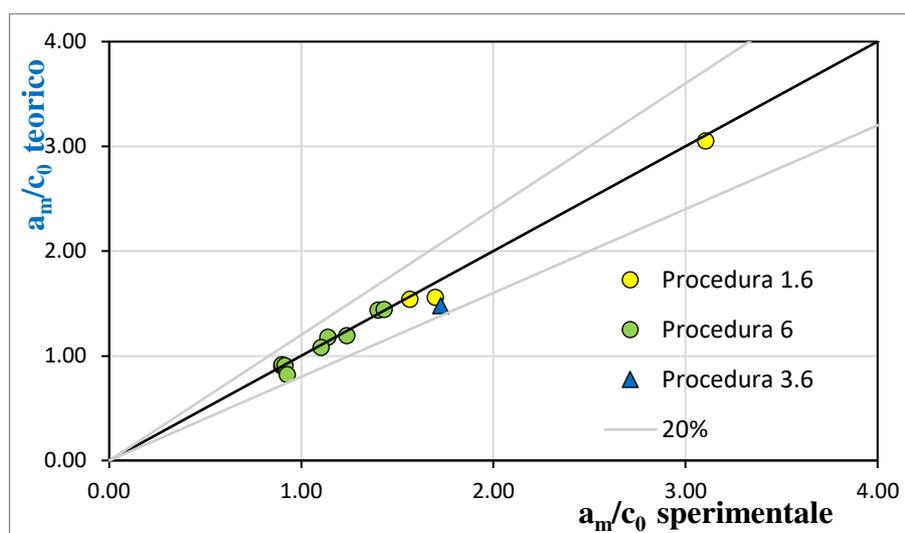


Figura. 23 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione d'onde di tipo C, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Come si osserva in Figura. 23, i tiranti ottenuti tramite tutte e tre le procedure attuate possono essere previsti con buona approssimazione dal modello teorico, a meno di un errore massimo del $\pm 20\%$. Entrando nel dettaglio, il modello teorico approssima molto bene i risultati ottenuti tramite la procedura 1.6, infatti, i punti nel grafico, si dispongono sopra la retta di 'perfect agreement'. Per quanto riguarda la procedura 6, la teoria approssima bene i risultati sperimentali, tuttavia, tende ad una sovrastima del tirante Y_2 , per questo motivo, i punti nel grafico, tendono a rimanere sopra la retta. Ponendo l'attenzione sul punto nel grafico riferito a l'ultima procedura sperimentale attuata (procedura 3.6), questo si posiziona praticamente sopra la retta che rappresenta un errore del 20% tra il dato misurato e quello calcolato, questo significa

che il modello teorico sottostima in maniera molto evidente il tirante sperimentale; si è ritenuto comunque accettabile questo dato poiché non supera il 20% di errore. Queste affermazioni trovano corrispondenza con gli esempi in Figura. 22.a ed in Figura. 22.b, dove abbiamo differenza di livelli impercettibili, nella zona intermedia, mentre, nel caso riportato in Figura. 22.c (procedura 3.6), a causa del picco presente nelle misurazioni, questa differenza risulta più evidente.

Come per i risultati delle configurazioni d'onda precedenti si vuole fare qualche considerazione sulle velocità delle onde; per poter confrontare i risultati derivanti dal modello, si è reso necessario misurare la celerità valutando il tempo necessario al fronte d'onda per percorrere la distanza tra una sonda ed un'altra. In questo caso, sia l'onda di valle che di monte sono a fronte diffuso, quindi, entrambe le celerità sono calcolate nel modello come media tra la celerità del piede e quella della cresta dell'onda. La celerità misurata e calcolata, per ogni prova, viene scalata con la celerità relativa della corrente indisturbata, $c_0 = \sqrt{gY_0}$; si ottiene in questo modo, come per il tirante intermedio, una disposizione di punti attorno ad una retta inclinata a 45°. Nel seguente grafico, si riportano i rapporti sperimentali in ascissa, mentre, i risultati teorici in ordinata; per ogni prova, si entra con i risultati relativi ai singoli assi e si ricava un punto che potrà disporsi sopra la retta di 'perfect agreement', se i due valori sono uguali, oppure, tanto più lontano da questa quanto più è alto l'errore.



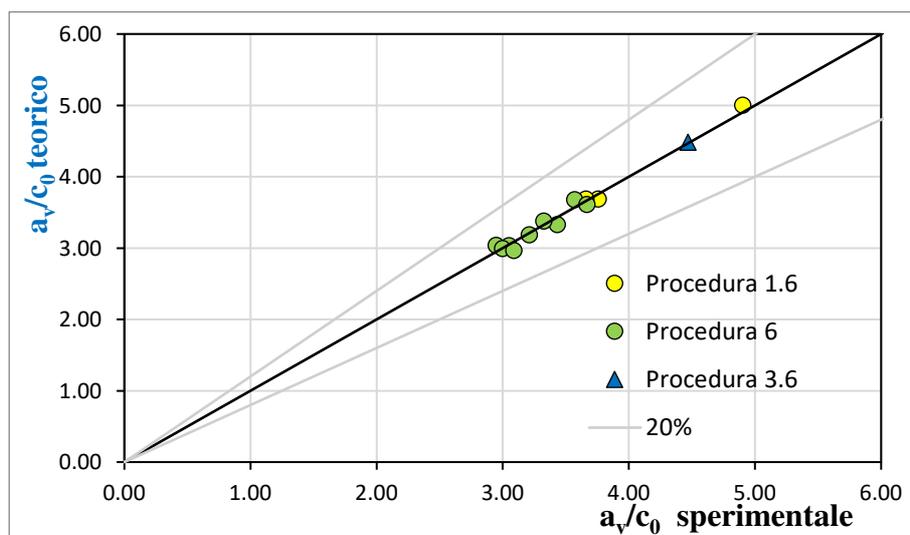


Figura. 24 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di monte (in alto) e dell'onda di valle (in basso) scalate con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

Partendo dalla celerità di monte, in Figura. 24, si osserva che il modello teorico calcola una celerità accettabile, a meno di un errore del $\pm 20\%$, rispetto la celerità misurata per tutte le procedure sperimentali. In particolare, i punti riferiti ai risultati della celerità di monte per la procedura 6, si dispongono in maniera omogenea e non troppo distante, intorno alla retta inclinata di 45° . I risultati ottenuti tramite il confronto tra il modello teorico e la procedura 1.6, si dispongono tutti sotto la retta di 'perfect agreement', questo sta a significare che la celerità risultante dalla teoria è leggermente sottostimata rispetto quella sperimentale; questa affermazione trova riscontro anche in Figura. 22.a, in cui si può notare che il fronte teorico dell'onda di monte è appena posticipato rispetto quello misurato dalle sonde. Per quanto riguarda, invece la celerità di monte per la procedura 3.6, si può notare che il risultato del modello teorico è più basso rispetto quello sperimentale in maniera evidente dal grafico; il punto si posiziona comunque all'interno dell'intervallo di errore massimo ammissibile, quindi la corrispondenza tra il modello e la realtà sperimentale è verificata; per le stesse motivazione della procedura 1.6, anche per questa considerazione si può trovare riscontro in Figura. 22.

Per quanto riguarda la celerità di valle della configurazione, si ha che i risultati ottenuti dal modello teorico risultano di buona approssimazione per tutte le celerità di valle, misurate per le diverse procedure possibili; i punti nel grafico, infatti, si dispongono tutti intorno alla retta

inclinata a 45° in maniera omogenea e ravvicinata, stando a significare che l'errore tra i valori teorici e quelli sperimentali è molto basso. Anche questa considerazione trova un riscontro in Figura. 22, in cui i fronti teorici dell'onda di valle coincidono con quelli sperimentali, in ogni istante considerato.

3.3.6 Onda di tipo Aw

Vengono riportati i risultati ottenuti anche per le configurazioni di onde singole. Come già enunciato nel paragrafo 3.2.2, per ottenere sperimentalmente le onde di tipo Aw è stata impiegata la procedura 4. In questo paragrafo, si riportano alcuni esempi di risultati ottenuti dal suo impiego.

In particolare, si mettono a confronto le configurazioni di onde sperimentali, ottenute dalla misurazione delle sonde, con le curve teoriche, ricavate dal modello. L'istante in cui la manovra viene effettuata è segnalato tramite una retta rossa; da questo istante in poi sono riportate le onde di valle alla paratoia.

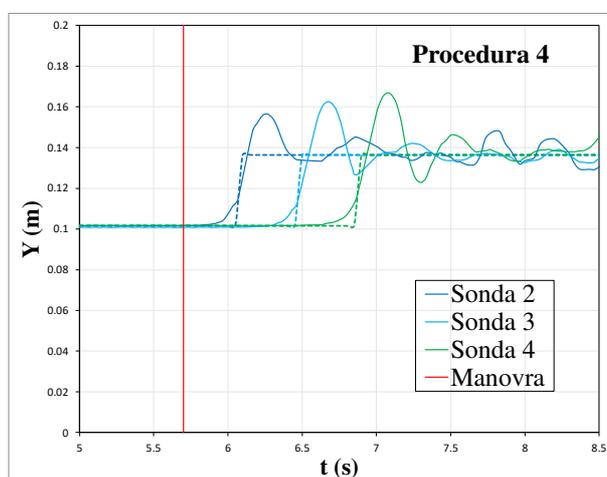


Figura. 25 Confronto onde sperimentali di tipo Aw con quelle teoriche per le quattro procedure possibili.

Dalla Figura. 25, si può notare come le configurazioni di onde singole Aw misurate con le sonde, essendo caratterizzate da un efflusso rigurgitato, presentano un andamento dei livelli

più ondulato rispetto le configurazioni esaminate finora; in particolare, le registrazioni mostrano un innalzamento istantaneo dopo la manovra e poi un andamento ondulatorio attorno ad un tirante costante dell'acqua. In aggiunta non è visibile il tirante che si va a formare in corrispondenza della luce a valle della paratoia (Y_1) poiché le sonde sono state fissate ad una distanza superiore rispetto al punto in cui si crea l'efflusso (Figura 4). La curva teorica, ottenuta dal modello implementato in excel, prevede in maniera adeguata l'andamento generale della configurazione, non solo dal punto di vista temporale, ma anche per quanto riguarda l'approssimazione del tirante posto a monte dell'onda di valle (Y_2).

Si riporta qualche considerazione sulla corrispondenza tra i parametri ottenuti dal modello teorico con quelli misurati sperimentalmente; vengono di seguito riportate alcune considerazioni sui livelli nella zona intermedia, a monte dell'onda che si viene a creare (Y_2) e sulla celerità dell'onda di valle (a_v). Per prima cosa si esaminano i livelli Y_2 , per ogni caso sperimentale, si è calcolato il rapporto Y_2/Y_0 utilizzando sia il tirante intermedio misurato sperimentalmente che, quello risultante dal modello; in questo modo, è stato possibile ricavare il seguente grafico di confronto con in ascissa il rapporto tra i tiranti misurati e, in ordinata, il rapporto teorico. Come nei casi precedenti, la differenza tra i valori teorici e quelli sperimentali, la si valuta in funzione della distanza dei singoli punti dalla retta inclinata di 45° .

Dalla Figura. 26 è evidente che il modello teorico approssima molto bene il livello a monte dell'onda di valle, infatti, per tutte le prove, il risultato teorico risulta quasi uguale a quello sperimentale e i punti si dispongono in corrispondenza della retta di 'perfect agreement'. Anche in questo caso sono stati considerati accettabili gli errori tra tirante teorico e sperimentale, fino ad un massimo del 20 %.

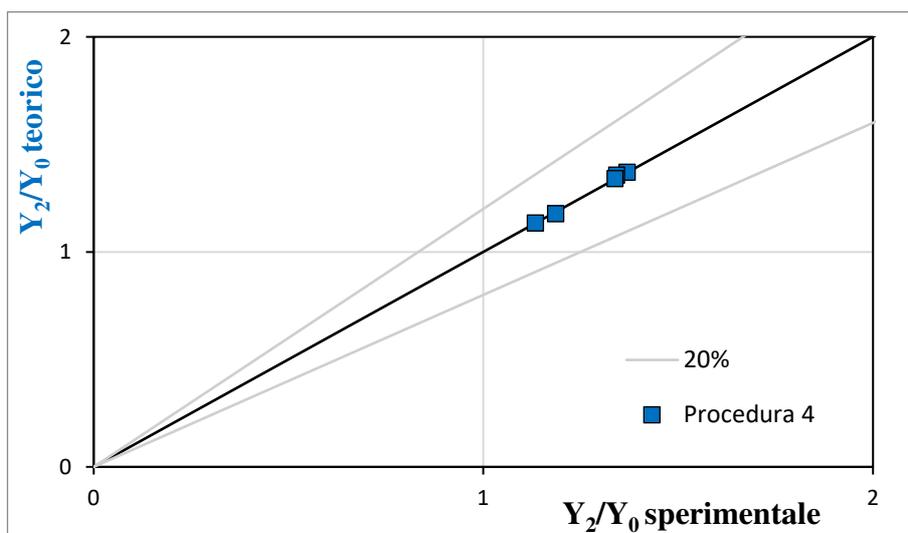


Figura. 26 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione d'onde di tipo Aw, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Si effettua qualche considerazione sulla celerità dell'unica onda che si viene a creare; per poter confrontare i risultati derivanti dal modello, si è reso necessario misurare la celerità valutando il tempo necessario al fronte d'onda per percorrere la distanza tra una sonda ed un'altra. Come è stato fatto per le configurazioni di doppia onda, la celerità è stata misurata e calcolata, per ogni prova, per poi essere scalata con la celerità relativa della corrente indisturbata, $c_0 = \sqrt{gY_0}$; si è ottenuto in questo modo, come per il tirante intermedio, una disposizione di punti attorno ad una retta inclinata a 45° . Nel seguente grafico, in ascissa si riportano i rapporti sperimentali mentre, in ordinata, i risultati teorici.

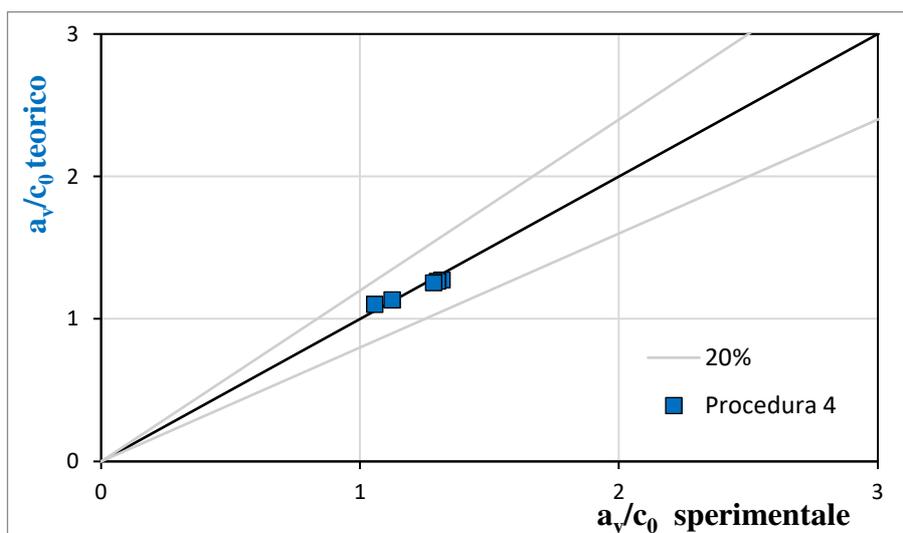


Figura. 27 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di valle (in basso) scalata con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

Risulta evidente che il modello teorico utilizzato per la previsione della configurazione di tipo Aw e dei suoi parametri caratteristici, risulta adeguato al calcolo della celerità dell'onda di valle, infatti, tutti i punti si dispongono in prossimità della retta: la celerità calcolata si avvicina parecchio a quella misurata. Una conferma di questa affermazione la si può ottenere osservando la Figura. 25, in cui il fronte d'onda teorico si posiziona esattamente in corrispondenza del fronte d'onda sperimentale.

3.3.7 Onda di tipo Cw

Come già enunciato nel paragrafo 3.2.2, per ottenere sperimentalmente le onde di tipo Cw è stata impiegata la procedura 2. In questo paragrafo, si riportano alcuni esempi di risultati ottenuti dall'impiego delle singole procedure.

In particolare, si mettono a confronto le configurazioni di onde sperimentali, ottenute dalla misurazione delle sonde, con le curve teoriche, ricavate dal modello. L'istante in cui la manovra viene effettuata è segnalato tramite una retta rossa; da questo istante in poi sono riportate le onde di valle alla paratoia. Nel seguente grafico vengono differenziate le onde derivanti dalla

misurazione delle sonde, tramite linea continua, e quelle risultanti dal modello teorico utilizzato, tramite linea tratteggiata.

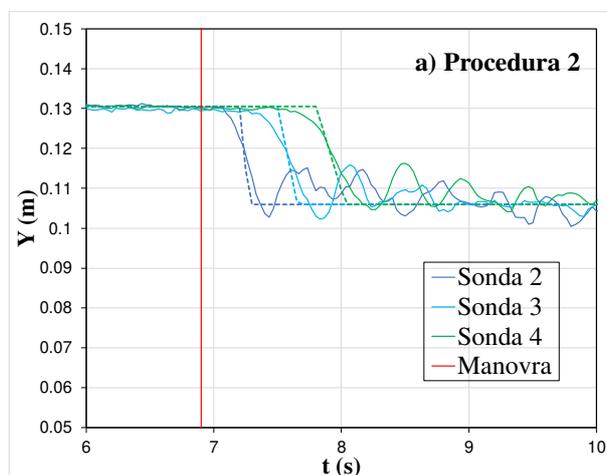


Figura. 28 Confronto onde sperimentali di tipo Cw con quelle teoriche per le procedure possibili.

In Figura. 28, si osserva che il modello teorico approssima bene le curve sperimentali ottenute tramite la procedura 2; in particolare, anche se il livello dell'acqua sperimentale a monte dell'onda risulta piuttosto ondulato a causa del rigurgito che si viene a creare, il modello riesce a calcolare un tirante a monte dell'onda (Y_2) che risulta circa pari al livello medio dato dalle misurazioni.

Anche per la configurazione di tipo Cw, sono stati elaborati i dati ottenuti sperimentalmente e teoricamente, Si riporta qualche considerazione sulla corrispondenza tra i parametri ottenuti dal modello teorico con quelli misurati sperimentalmente; vengono di seguito riportate alcune considerazioni sui livelli dopo a monte dell'onda che si viene a creare (Y_2) e sulla celerità dell'onda di valle (a_v). Per prima cosa si effettua qualche considerazione sui livelli Y_2 : per ogni caso sperimentale, si è calcolato il rapporto Y_2/Y_0 utilizzando sia il tirante intermedio misurato sperimentalmente che, quello risultante dal modello; in questo modo, è stato possibile ricavare il seguente grafico di confronto con in ascissa il rapporto tra i tiranti misurati e, in ordinata, il rapporto teorico.

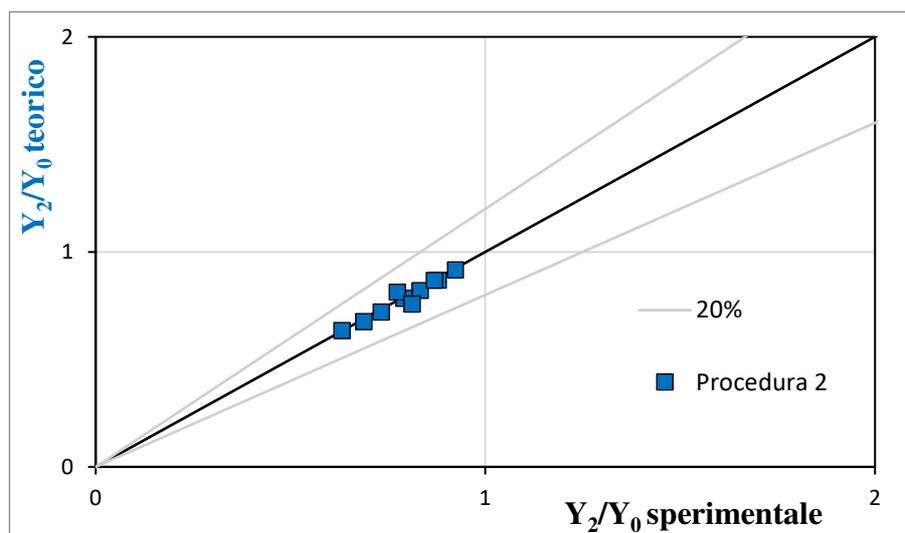


Figura. 29 Confronto teorico/sperimentale dei rapporti tra il livello nella zona intermedia ed il livello a valle della configurazione d'onde di tipo Cw, l'asse delle ascisse rappresenta i valori sperimentali misurati mentre, quello delle ordinate, rappresenta i risultati del modello.

Si osserva in Figura. 29 che, come si poteva prevedere dalla Figura. 28, i risultati del tirante Y_2 , dati dal modello, sono molto vicini a quelli misurati sperimentalmente in laboratorio poiché i punti all'interno del grafico si dispongono perlopiù in corrispondenza la retta inclinata a 45° , rimanendo chiaramente all'interno dell'intervallo di errore accettabile considerato.

Viene effettuata anche qualche considerazione sulla celerità dell'onda che compare a valle; per fare questo si è reso necessario misurare sperimentalmente la celerità dell'onda andando a calcolare il tempo impiegato da questa per percorrere la distanza da una sonda all'altra; questo risultato sperimentale e quello teorico, ottenuto dal modello, sono stati scalati con la celerità relativa della corrente di valle pari a $c_0 = \sqrt{gY_0}$. In questo modo, si è potuto ricostruire un grafico avente la stessa forma di quello in Figura. 29, in cui in ascissa sono disposti i risultati sperimentali ed in ordinata quelli teorici; l'uguaglianza tra essi si ha quando il punto ricade perfettamente sopra la retta di accordo perfetto.

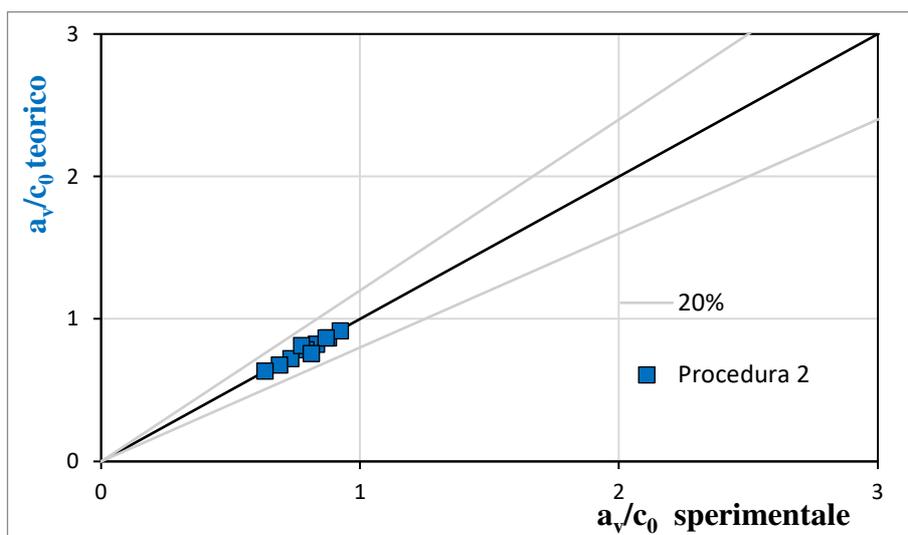


Figura. 30 Confronto tra i valori sperimentali e teorici delle celerità di propagazione dell'onda di valle (in basso) scalata con la celerità relativa c_0 di una piccola perturbazione relativa alla corrente indisturbata.

Osservando la Figura. 30, si può affermare che la celerità dell'onda calcolata attraverso il modello teorico prevede più che adeguatamente la celerità sperimentale, calcolata dalle misurazioni delle sonde, infatti, tutti i punti ricadono sopra o, al massimo, in prossimità della retta inclinata di 45° . Questa affermazione trova riscontro visivo in Figura. 28, in cui è evidente la corrispondenza temporale tra il fronte teorico e quello sperimentale.

4 Conclusioni

In questo elaborato si è raggiunto l'obiettivo di studiare e caratterizzare le possibili configurazioni d'onda che potrebbero crearsi a seguito di un'immissione istantanea di una corrente rapida a monte di un flusso preesistente. In particolare, si è proceduto tramite l'attuazione di diverse procedure sperimentali, usufruendo della canaletta artificiale e di altri strumenti, elencanti nel paragrafo 3.2.1, tramite i quali è stato possibile riprodurre le diverse configurazioni; di particolare importanza risulta il dispositivo poroso, tramite il quale è stato possibile ricavare un numero consistente di dati, in aggiunta a quelli già presenti in letteratura da Montuori e Greco (1973). In secondo luogo, i risultati sperimentali sono stati verificati tramite il modello teorico inserendo come forzanti di input: velocità U_0 e tirante Y_0 della corrente indisturbata; il tirante della corrente ipercritica Y_1 , dalle misurazioni delle sonde e la rispettiva velocità U_1 , calcolata utilizzando la legge di efflusso e i dati misurati.

La bontà del modello implementato è stata verificata per tutte e sei le configurazioni possibili: quelle di tipo A, tipo B, tipo C e tipo D, cioè quelle in cui si viene a creare un sistema di doppia onda; poi anche per quelle di tipo Aw e tipo Cw, in cui, invece, è impedita la formazione dell'onda di monte, quindi, il sistema è composto da un singolo fronte che si muove verso valle. Nel complesso, per le onde di tipo A, il modello risulta più che adatto a rappresentare la possibile configurazione risultante dalle procedure attuate (paragrafo 3.2.2); in particolare, i suoi parametri caratteristici, cioè: il tirante nella zona intermedia Y_2 , la celerità dell'onda di monte a_m e la celerità dell'onda di valle a_v , calcolate dal modello, risultano molto simili a quelle misurate sperimentalmente con la procedura 3.5, mentre, risultano discostarsi dai dati sperimentali ottenuti tramite la procedura 1.5, mantenendo un errore sempre inferiore al 20%.

Per quanto riguarda la configurazione di tipo B, il modello risulta adatto a rappresentare le onde risultanti da entrambe le procedure sperimentali adottate; il tirante nella zona intermedia vede una corrispondenza maggiore tra risultato teorico e quello ottenuto dalla procedura 3 piuttosto che dalla procedura 3.5; mentre, i valori delle celerità a_m e a_v , calcolate dal modello, risultano più simili a quelle misurate dalle configurazioni ottenute tramite la procedura 3.5, rispetto

quelle con la procedura 3; in tutti i casi il modello approssima molto bene la celerità delle onde di questa tipologia di configurazione, infatti, l'errore massimo rilevato è pari al 10%.

La configurazione di onde di tipo C, vede una buona corrispondenza tra curva teorica e curva sperimentale (Figura. 19). Si osserva, dal confronto tra le curve e dai risultati numerici, che tramite le procedure 1 e 2, il tirante teorico Y_2 viene sovrastimato rispetto quello sperimentale, mentre, per le procedure 1.6 e 2.6 il modello risulta esprimere più adeguatamente il valore del tirante della zona intermedia. La celerità di monte è sovrastimata dal modello, tranne nel caso in cui venga confrontata con quella ottenuta dalla procedura 2.6, in cui la teoria sottostima il valore di celerità rispetto quello misurato, fino ad un errore massimo poco superiore del 10%.

Per quanto riguarda la bontà del modello per la configurazione di tipo D, il modello risulta predire adeguatamente le onde sperimentali che si creano ma, si nota un errore fino al 20%, tra i risultati teorici, relativi al tirante nella zona intermedia e alla celerità e quelli ottenuti tramite la procedura 3.6, dalla quale risultano delle configurazioni di onde che si discostano dalla previsione teorica.

Infine, è stata verificata la corrispondenza tra la teoria ed i risultati sperimentali delle configurazioni di onda singola di tipo Aw e di tipo Cw. Come si può chiaramente osservare nel capitolo precedente, in entrambi i casi, il modello teorico riesce a prevedere, con errori trascurabilmente piccoli, sia il tirante nella zona intermedia che la celerità dell'onda che si viene a creare.

Le differenze riscontrate tra previsioni teoriche e risultati sperimentali sono in parte da attribuire ai limiti propri dell'inquadramento teorico, primo fra tutti l'assunzione di distribuzione idrostatica delle pressioni, ma anche ai limiti che caratterizzano le procedure sperimentali adottate che non consentono, come assunto dalla teoria, di imporre istantaneamente (o comunque molto rapidamente) un valore costante nel tempo di livello e velocità.

Il buon accordo generale tra previsioni teoriche e risultati sperimentali, tuttavia, prova la correttezza della procedura teorica che è stata sviluppata mediante lo stesso approccio utilizzato nel passato da Montuori (1968) e Montuori e Greco (1973), dunque, questa può essere impiegata per l'analisi e la previsione di questo tipo di configurazioni che si possono creare in diversi casi pratici e che interessano canali a pelo libero esistenti, caratterizzati da un'immissione da monte di flussi di corrente supercritica, provenienti da opere esistenti.

5 Appendice

In questo capitolo si riportano in tabella, tutti i dati ricavati dalla sperimentazione; prima i dati geometrici e quelli misurati, poi quelli ottenuti dal modello teorico.

Tabella 2 I dati geometrici sono: l'inclinazione della canaletta i_f ; l'apertura della paratoia iniziale w_0 e finale w_1 ; la portata regolata da monte Q_0 altezza della paratoia di valle Y_{pvalle} e il coefficiente delle perdite di carico dovute alla presenza del dispositivo poroso prima della manovra α_0 e dopo la manovra α_1 . I dati misurati sono: il tirante di moto stazionario prima della manovra Y_0 ; il tirante a monte della configurazione di doppia onda Y_1 ; il tirante a monte della paratoia, prima della manovra Y_A ; il tirante a monte della paratoia, dopo la manovra Y_B ; il tirante nella zona intermedia della configurazione Y_2 , la celerità dell'onda di monte della configurazione a_m ; la celerità dell'onda di valle della configurazione a_v .

Prova	procedure	i_f (%)	Q_0 (l/s)	w_0 (cm)	w_1 (cm)	Y_0 (cm)	Y_1 (cm)	TIPO	α_0	α_1	Y_{pvalle} (cm)	Y_A (cm)	Y_B (cm)	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)
1	2	0.50	20.80	-	3.50	12.98	2.10	Cw	-	-	5.00	-	17.5	10.1	-	1.47
2	2	0.50	20.80	-	3.50	13.05	2.10	Cw	-	-	5.00	-	17.5	10.6	-	1.46
3	2	0.50	19.10	-	3.50	7.72	2.40	C	-	-	3.00	-	15.5	6.6	0.33	1.67
4	2	0.50	19.10	-	3.50	7.66	2.38	C	-	-	1.00	-	14.3	6.5	0.31	1.72
5	2	0.50	20.10	-	3.50	7.49	2.45	C	-	-	0.00	-	15.0	6.6	0.36	1.67
6	5	0.50	9.80	3.25	3.25	2.19	2.23	A	0.60	-	0.00	22.50	21.8	3.5	1.11	2.13
7	5	0.50	7.40	3.25	3.25	2.09	2.18	A	0.60	-	0.00	23.60	22.0	3.5	1.18	2.00
8	6	0.50	8.50	3.25	3.25	2.25	1.98	D	-	0.60	0.00	11.10	12.4	1.3	0.58	1.61
9	5	0.50	5.60	3.25	3.25	2.00	2.10	A	0.60	-	0.00	14.30	13.4	3.1	0.83	1.67
10	6	0.50	17.00	6.20	6.20	3.90	3.50	D	-	0.60	-	14.5	16.8	2.4	0.56	1.89
11	5	0.50	13.30	6.20	6.20	3.59	3.88	A	0.60	-	-	23.2	21.6	5.5	0.91	2.13
12	6	0.50	17.00	6.20	6.20	3.88	3.42	D	-	0.60	-	14.5	17.0	2.5	0.56	1.82
13	5	0.50	12.80	6.20	6.20	3.62	3.94	A	0.60	-	-	22.6	21.6	5.5	0.84	2.04
14	6	0.50	20.00	6.20	6.20	4.00	3.54	D	-	0.60	-	18.9	21.4	2.3	0.71	2.08
15	5	0.50	14.50	6.20	6.20	3.70	3.95	A	0.60	-	-	27.9	25.2	5.7	1.10	2.22
16	6	0.50	15.80	6.20	6.20	3.75	3.20	D	-	0.60	-	13.1	16.0	2.4	0.56	1.82
17	5	0.50	11.60	6.20	6.20	3.42	3.72	A	0.60	-	-	18.1	17.9	5.1	0.75	2.00
18	6	0.50	16.90	5.00	5.00	3.33	3.12	D	-	0.60	-	19.97	21.7	1.9	0.80	2.04
19	5	0.50	16.00	5.00	5.00	3.32	3.20	A	0.60	-	-	40.7	38.8	6.4	1.59	2.57
20	6	0.50	16.90	5.00	5.00	3.29	2.90	D	-	0.60	-	19.78	21.8	1.8	0.81	2.08

Tabella 2 Continua

Prova	procedure	i_r (%)	Q_0 (l/s)	w_0 (cm)	w_1 (cm)	Y_0 (cm)	Y_1 (cm)	TIPO	α_0	α_1	Y_{Pvalle} (cm)	Y_A (cm)	Y_B (cm)	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)
21	5	0.50	16.70	5.00	5.00	3.41	3.31	A	0.60	-	-	40.7	38.8	6.4	1.49	2.56
22	6	0.50	12.50	5.00	5.00	3.29	2.90	D	-	0.60	-	11.77	13.3	2.1	0.53	1.75
23	5	0.50	12.35	5.00	5.00	3.22	3.23	A	0.60	-	-	24.98	23.1	5.3	1.06	2.17
24	5	0.50	9.75	5.00	5.00	3.00	3.37	A	0.60	-	-	17.13	15.0	4.6	0.71	1.89
25	6	0.50	14.10	5.00	5.00	3.27	2.80	D	-	0.60	-	14.56	16.2	2.1	0.63	1.82
26	5	0.50	13.75	5.00	5.00	3.23	3.25	A	0.60	-	-	30.67	28.7	5.8	1.18	2.27
27	2	0.50	17.00	-	5.00	5.80	3.17	C	-	-	-	6.5	10.9	5.4	0.40	1.67
28	2	0.50	16.90	-	5.00	5.74	3.19	C	-	-	-	6.4	10.5	5.6	0.39	1.82
29	2	0.50	18.80	-	5.00	6.65	3.25	C	-	-	-	7.4	12.9	6.2	0.43	1.82
30	2	0.50	21.00	-	5.00	6.75	3.24	C	-	-	-	7.6	13.2	6.0	0.42	1.82
31	2	0.50	16.45	-	3.00	5.64	1.81	C	-	-	-	6.3	12.4	4.3	0.43	1.67
32	2	0.50	16.40	-	3.00	5.57	1.56	C	-	-	-	6.3	12.9	4.3	0.45	1.67
33	2	0.50	20.60	-	3.00	6.62	1.78	C	-	-	-	7.3	14.3	4.9	0.40	1.67
34	2	0.50	20.50	-	3.00	6.57	1.74	C	-	-	-	7.4	14.9	4.9	0.38	1.82
35	2	0.50	24.80	-	3.00	7.80	1.69	C	-	-	-	8.4	17.5	5.5	0.48	1.79
36	2	0.50	24.80	-	3.00	7.54	1.56	C	-	-	-	8.4	17.2	5.3	0.42	1.79
37	4	0.50	0.00	-	2.50	6.51	1.55	Aw	-	-	8.00	18.6	15.9	8.9	-	1.05
38	4	0.50	0.00	-	2.50	2.70	1.85	A	-	-	5.00	33.4	30.2	9.2	0.63	1.43
39	4	0.00	0.00	-	2.50	3.46	1.85	A	-	-	4.00	37.7	34.4	10.1	0.56	1.43
40	1.6	0.30	26.20	10.00	1.00	6.42	0.65	C	-	0.60	-	15.1	21.7	2.4	0.43	1.55
41	1.6	0.30	25.90	10.00	1.00	6.42	0.61	C	-	0.60	-	15.1	23.2	2.7	0.43	1.54
42	1.6	0.30	26.20	10.00	1.80	6.42	1.19	C	-	0.60	-	14.8	20.9	3.3	0.45	1.67
43	1.6	0.30	26.10	10.00	1.80	6.25	1.06	C	-	0.60	-	15.0	21.7	3.2	0.50	1.75
44	1.6	0.30	26.20	10.00	0.78	6.25	0.47	C	-	0.60	-	14.9	21.9	2.5	0.43	1.49
45	1.6	0.30	26.10	10.00	0.78	6.34	0.48	C	-	0.60	-	15.1	21.9	2.4	0.41	1.54
46	2.6	0.80	25.50	10.00	2.50	7.53	1.85	C	-	0.60	-	7.8	18.4	4.2	0.37	1.54
47	2.6	0.80	25.30	10.00	2.50	7.42	1.90	C	-	0.60	-	7.9	19.5	3.7	0.40	1.82
48	2.6	0.80	30.40	10.00	2.50	8.35	1.95	C	-	0.60	-	8.9	20.4	4.4	0.37	1.67
49	2.6	0.80	30.30	10.00	2.50	8.35	1.90	C	-	0.60	-	8.9	20.8	4.6	0.40	1.82
50	1.6	0.80	24.90	4.70	1.80	2.94	1.10	D	-	0.60	-	40.3	43.4	0.5	1.67	2.63
51	1.6	0.80	14.90	4.70	3.24	2.89	2.26	D	-	0.60	-	41.3	19.3	1.3	0.83	2.00
52	1.6	0.80	15.30	4.70	3.24	2.93	2.20	D	-	0.60	-	18.0	19.5	1.4	0.91	1.96
53	3	0.80	12.10	3.00	12.79	1.90	8.28	B	-	-	-	25.6	17.4	3.4	1.00	2.78
54	3	0.80	14.20	3.00	12.79	2.00	8.00	B	-	-	-	32.1	24.1	3.9	1.39	3.13
55	3.5	0.80	7.00	2.00	12.79	1.20	7.90	B	0.60	-	-	35.5	27.2	4.9	1.47	2.94

Tabella 2 Continua

Prova	procedure	i_f (%)	Q_0 (l/s)	w_0 (cm)	w_1 (cm)	Y_0 (cm)	Y_1 (cm)	TIPO	α_0	α_1	Y_{Pvalle} (cm)	Y_A (cm)	Y_B (cm)	Y_2 (cm)	a_u (m/s)	a_d (m/s)
56	3.5	0.80	7.00	1.90	12.79	1.20	8.00	B	0.60	-	-	35.1	26.7	4.7	1.43	2.86
57	3.5	0.80	6.00	1.90	12.79	1.20	8.40	B	0.60	-	-	26.2	16.8	3.8	0.87	2.38
58	4	0.00	0.00	0.00	2.46	12.01	1.53	Aw	-	-	8.00	27.7	26.2	14.2	0.00	1.22
59	4	0.00	0.00	0.00	2.46	12.63	1.53	Aw	-	-	12.50	23.5	22.0	14.3	0.00	1.18
60	3	0.60	5.00	1.90	5.00	1.46	2.88	B	-	-	-	11.6	9.0	2.0	0.68	1.72
61	3	0.60	6.10	2.00	6.20	1.54	4.12	B	-	-	-	13.5	9.8	2.3	0.67	1.89
62	3	0.60	7.90	1.90	6.20	1.50	4.05	B	-	-	-	24.6	21.0	2.8	1.33	2.50
63	3.5	0.60	2.40	0.80	6.20	0.89	4.11	B	0.60	-	-	14.5	9.7	2.5	0.70	1.75
64	3.5	0.60	2.90	0.80	6.20	0.83	4.11	B	0.60	-	-	26.7	16.3	2.9	1.05	2.00
66	3.5	0.60	2.70	0.80	6.20	0.93	4.05	B	0.60	-	-	19.6	15.0	3.5	0.95	1.85
67	3.6	0.60	10.00	3.00	6.20	2.03	3.70	D	-	0.60	-	18.3	17.5	1.9	0.77	1.99
68	4	0.00	0.00	0.00	6.20	2.45	3.98	A	-	-	2.30	30.0	25.3	9.3	0.69	1.74
69	4	0.00	0.00	0.00	6.20	2.44	4.05	A	-	-	2.40	23.8	18.5	8.6	0.50	1.43
70	4	0.00	0.00	0.00	6.20	2.51	4.15	A	-	-	2.35	19.9	14.6	8.1	0.38	1.39
71	2	0.20	20.10	0.00	3.22	15.05	1.93	Cw	-	-	7.00	14.9	19.1	12.5	0.00	1.47
72	2	0.20	15.30	0.00	3.22	15.11	1.93	Cw	-	-	8.50	15.0	18.0	13.3	0.00	1.43
73	2	0.20	10.30	0.00	3.22	15.63	1.93	Cw	-	-	11.00	15.3	17.0	14.4	0.00	1.33
74	2	0.20	10.00	0.00	1.00	15.62	0.60	Cw	-	-	11.00	15.4	18.0	13.6	0.00	1.28
75	2	0.20	15.40	0.00	1.00	15.45	0.60	Cw	-	-	9.00	15.2	19.4	12.2	0.00	1.27
76	2	0.20	20.50	0.00	1.00	15.46	0.60	Cw	-	-	7.50	15.3	20.8	11.3	0.00	1.28
77	2	0.20	24.60	0.00	1.00	15.52	0.60	Cw	-	-	6.50	25.3	22.5	10.7	0.00	1.37
78	2	0.20	30.00	0.00	1.00	15.61	0.60	Cw	-	-	5.50	15.4	24.2	9.9	0.00	1.41
79	4	0.00	0.00	0.00	6.20	6.87	3.78	A	-	-	0.00	22.2	17.9	12.38	0.00	1.32
80	4	0.00	0.00	0.00	6.20	10.75	3.81	Aw	-	-	0.00	22.9	19.6	14.4	0.00	1.33
81	4	0.00	0.00	0.00	6.20	10.16	3.81	Aw	-	-	0.00	20.3	17.0	13.6	0.00	1.28
82	1	0.20	3.80	0.80	6.20	0.81	4.13	B	-	-	0.00	17.5	12.6	2.0	0.95	2.04
83	1	0.5	30.30	10.00	2.20	6.10	1.40	C	-	-	0.00	18.2	24.9	4.30	1.05	2.33
84	1	0.5	20.80	6.00	2.20	3.95	1.45	C	-	-	0.00	20.3	23.9	2.88	1.25	2.22

Tabella 2 Continua

Prova	procedure	i_f (%)	Q_0 (l/s)	w_0 (cm)	w_1 (cm)	Y_0 (cm)	Y_1 (cm)	TIPO	α_0	α_1	Y_{Pvalle} (cm)	Y_A (cm)	Y_B (cm)	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)
85	1	0.5	19.00	6.00	1.50	3.70	0.90	C	-	-	0.00	17.7	21.5	2.40	1.25	2.24
86	1	0.5	21.50	6.00	1.50	3.70	0.90	C	-	-	0.00	22.2	26.3	2.35	1.43	2.38
87	1	0.5	28.10	8.00	1.50	5.00	0.90	C	-	-	0.00	21.5	27.5	3.20	1.33	2.33
88	3.5	0.5	3.90	2.00	2.83	2.15	2.08	A	0.60	-	0.00	9.1	6.2	3.15	0.35	1.18
89	3.5	0.5	3.85	2.00	2.83	1.93	2.11	A	0.60	-	0.00	8.2	7.1	2.76	0.40	1.25
90	3.5	0.5	9.85	4.00	6.46	4.02	3.97	A	0.60	-	0.00	18.9	16.6	6.52	0.58	1.69
91	1.5	0.5	10.50	5.25	2.00	3.26	1.24	A	0.60	-	0.00	16.9	18.6	3.55	0.75	1.67
92	1.5	0.5	5.90	3.00	1.00	2.11	0.83	A	0.60	-	0.00	14.1	15.4	2.72	1.43	1.54

Tabella 3 Nella seguente tabella, ogni prova viene numerata e classificata in base alla procedura. Poi si riportano, in nero, i parametri calcolati, cioè: il coefficiente di contrazione c_c ; la velocità della corrente preesistente U_0 ; la celerità relativa di una piccola perturbazione della corrente indisturbata c_0 ; il numero di Froude della corrente indisturbata F_0 ; la velocità della corrente di monte U_1 ed il rispettivo numero di Froude F_1 ; in rosso sono riportati i parametri calcolati per la classificazione delle onde sperimentali, all'interno del campo di esistenza. I valori che sono riportati in blu sono i risultati del modello teorico, cioè: il tirante nella zona intermedia della configurazione Y_2 , la celerità dell'onda di monte della configurazione a_m ; la celerità dell'onda di valle della configurazione a_v ; il numero di Froude limite F_1^* .

Prova	procedure	c_c	U_0 (m/s)	c_0 (m/s)	F_0	U_1 (m/s)	F_1	$F_0 \sqrt{\eta} / F_1$	$\Delta F / F_1$	TIPO	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)	F_1^*
1	2	0.6	0.53	1.13	0.47	1.560	3.44	0.34	-1.15	C	10.55	-	1.48	3.72
2	2	0.6	0.53	1.13	0.47	1.546	3.41	0.34	-1.17	C	9.88	-	1.45	3.91
3	2	0.69	0.82	0.87	0.95	1.623	3.34	0.51	-0.54	C	7.45	0.40	1.67	2.27
4	2	0.68	0.83	0.87	0.96	1.551	3.21	0.54	-0.56	C	7.10	0.37	1.65	2.25
5	2	0.7	0.89	0.86	1.04	1.591	3.25	0.56	-0.52	C	7.02	0.44	1.71	2.25
6	5	-	1.49	0.46	3.22	1.970	4.21	0.76	0.00	A	3.46	1.31	2.15	1.44
7	5	0.67	1.18	0.45	2.62	1.945	4.21	0.61	0.01	A	4.23	1.17	1.98	1.46
8	6	0.61	1.26	0.47	2.68	0.915	2.08	1.38	-0.06	D	1.40	0.56	1.56	0.74
9	5	0.65	0.93	0.44	2.11	1.508	3.32	0.62	0.01	A	3.53	0.83	1.62	1.35
10	6	0.56	1.45	0.62	2.35	1.045	1.78	1.39	-0.06	D	2.56	0.56	1.88	0.76
11	5	0.63	1.23	0.59	2.08	1.838	2.98	0.67	0.03	A	6.00	1.03	2.12	1.31
12	6	0.55	1.46	0.62	2.37	1.054	1.82	1.39	-0.07	D	2.55	0.56	1.88	0.79
13	5	0.64	1.18	0.60	1.98	1.836	2.95	0.64	0.03	A	6.25	1.00	2.09	1.30
14	6	0.57	1.67	0.63	2.66	1.197	2.03	1.39	-0.06	D	2.54	0.74	2.12	0.74
15	5	0.64	1.31	0.60	2.17	2.067	3.32	0.63	0.02	A	6.49	1.15	2.24	1.32
16	6	0.52	1.40	0.61	2.32	1.023	1.83	1.37	-0.09	D	2.44	0.55	1.82	0.81
17	5	0.6	1.13	0.58	1.95	1.705	2.82	0.66	0.03	A	5.47	0.89	1.97	1.26
18	6	0.62	1.69	0.57	2.96	1.220	2.21	1.39	-0.03	D	1.99	0.82	2.10	0.69
19	5	0.64	1.61	0.57	2.81	2.652	4.73	0.61	-0.01	A	6.47	1.64	2.61	1.73
20	6	0.58	1.71	0.57	3.01	1.227	2.30	1.40	-0.06	D	1.90	0.82	2.05	0.71

Tabella 3 Continua.

Prova	procedure	c_c	U_0 (m/s)	c_0 (m/s)	F_0	U_1 (m/s)	F_1	$F_0\sqrt{\eta}/F_1$	$\Delta F/F_1$	TIPO	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)	F^*_1
21	5	0.66	1.63	0.58	2.82	2.648	4.65	0.62	-0.01	A	6.80	1.64	2.63	1.68
22	6	0.58	1.27	0.57	2.23	0.921	1.73	1.37	-0.08	D	2.224	0.47	1.69	0.79
23	5	0.65	1.28	0.56	2.27	1.994	3.54	0.64	0.00	A	5.531	1.13	2.14	1.48
24	5	0.67	1.08	0.54	2.00	1.550	2.70	0.70	0.04	A	4.628	0.82	1.84	1.27
25	6	0.56	1.44	0.57	2.54	1.041	1.99	1.38	-0.08	D	2.044	0.61	1.81	0.81
26	5	0.65	1.42	0.56	2.52	2.249	3.98	0.63	0.00	A	5.954	1.34	2.33	1.57
27	2	0.63	0.98	0.75	1.30	1.287	2.31	0.76	-0.32	C	5.47	0.43	1.69	1.52
28	2	0.64	0.98	0.75	1.31	1.257	2.25	0.78	-0.31	C	5.31	0.42	1.69	1.55
29	2	0.65	0.94	0.81	1.17	1.422	2.52	0.66	-0.36	C	6.53	0.44	1.74	1.66
30	2	0.65	1.04	0.81	1.27	1.442	2.56	0.72	-0.36	C	6.29	0.49	1.81	1.62
31	2	0.6	0.97	0.74	1.31	1.457	3.46	0.67	-0.50	C	4.87	0.52	1.63	2.00
32	2	0.52	0.98	0.74	1.33	1.501	3.84	0.65	-0.54	C	4.69	0.54	1.62	2.26
33	2	0.59	1.04	0.81	1.29	1.580	3.78	0.66	-0.57	C	5.42	0.54	1.72	2.26
34	2	0.58	1.04	0.80	1.30	1.619	3.92	0.64	-0.56	C	5.47	0.56	1.73	2.32
35	2	0.56	1.06	0.87	1.21	1.797	4.41	0.59	-0.64	C	6.31	0.56	1.79	2.61
36	2	0.52	1.10	0.86	1.27	1.756	4.50	0.62	-0.66	C	5.88	0.58	1.79	2.74
37	4	0.62	0.00	0.80	0.00	1.584	4.06	0.00	-0.62	A	8.92	0.00	1.02	4.41
38	4	0.74	0.00	0.51	0.00	2.362	5.54	0.00	-0.08	A	9.37	0.69	1.43	3.86
39	4	0.74	0.00	0.58	0.00	2.532	5.95	0.00	-0.13	A	10.62	0.66	1.46	4.22
40	1.6	0.65	1.36	0.79	1.71	1.286	5.09	1.06	-1.29	C	2.52	0.51	1.55	2.92
41	1.6	0.61	1.34	0.79	1.69	1.332	5.44	1.01	-1.29	C	2.59	0.52	1.55	3.47
42	1.6	0.66	1.36	0.79	1.71	1.329	3.89	1.02	-0.87	C	2.96	0.53	1.67	2.27
43	1.6	0.59	1.39	0.78	1.78	1.274	3.95	1.09	-0.95	C	2.78	0.57	1.67	2.43
44	1.6	0.6	1.40	0.78	1.79	1.296	6.04	1.08	-1.49	C	2.21	0.51	1.50	4.17
45	1.6	0.61	1.37	0.79	1.74	1.296	5.98	1.06	-1.50	C	2.28	0.49	1.49	3.85
46	2.6	0.74	1.13	0.86	1.31	1.146	2.69	0.99	-0.90	C	4.22	0.32	1.59	1.91
47	2.6	0.76	1.14	0.85	1.33	1.180	2.73	0.96	-0.84	C	4.30	0.37	1.67	1.69
48	2.6	0.78	1.21	0.90	1.34	1.212	2.77	1.00	-0.93	C	4.47	0.35	1.67	1.92
49	2.6	0.76	1.21	0.90	1.34	1.223	2.83	0.99	-0.94	C	4.54	0.35	1.67	2.03
50	1.6	0.61	2.83	0.54	5.26	1.826	5.56	1.55	-0.25	D	0.51	1.64	2.69	0.55
51	1.6	0.7	1.72	0.53	3.23	1.164	2.47	1.48	-0.11	D	1.38	0.82	1.96	0.68
52	1.6	0.68	1.74	0.54	3.25	1.173	2.53	1.49	-0.12	D	1.35	0.83	1.98	0.71
53	3	0.65	2.12	0.43	4.92	1.519	1.69	1.40	0.75	B	2.91	0.92	2.72	0.54
54	3	0.63	2.37	0.44	5.34	1.886	2.13	1.25	0.56	B	3.16	1.34	3.00	0.60

Tabella 3 Continua.

Prova	procedure	c_c	U_0 (m/s)	c_0 (m/s)	F_0	U_1 (m/s)	F_1	$F_0\sqrt{\eta}/F_1$	$\Delta F/F_1$	TIPO	Y_2 (cm)	a_m (m/s)	a_v (m/s)	F^*_1
55	3.5	0.62	1.94	0.34	5.67	2.035	2.31	0.96	0.71	B	3.94	1.45	2.85	0.71
56	3.5	0.63	1.94	0.34	5.67	2.008	2.27	0.97	0.73	B	3.90	1.42	2.85	0.68
57	3.5	0.66	1.67	0.34	4.86	1.482	1.63	1.12	1.05	B	3.42	0.85	2.47	0.57
58	4	0.62	0.00	1.09	0.00	1.723	4.45	0.00	-1.16	C	14.15	0.00	1.23	6.95
59	4	0.62	0.00	1.11	0.00	1.366	3.53	0.00	-1.54	C	14.33	0.00	1.22	6.98
60	3	0.58	1.14	0.38	3.01	1.143	2.15	1.00	0.28	B	2.24	0.70	1.67	0.77
61	3	0.66	1.32	0.39	3.40	1.160	1.82	1.14	0.47	B	2.29	0.69	1.85	0.66
62	3	0.65	1.75	0.38	4.56	1.859	2.95	0.94	0.29	B	2.88	1.36	2.39	0.76
63	3.5	0.66	0.90	0.29	3.07	1.153	1.82	0.78	0.73	B	2.70	0.65	1.64	0.71
64	3.5	0.66	1.17	0.28	4.12	1.597	2.52	0.73	0.55	B	3.03	1.08	2.01	0.78
66	3.5	0.65	0.97	0.30	3.19	1.520	2.41	0.64	0.52	B	3.45	0.96	1.86	0.89
67	3.6	0.6	1.65	0.45	3.69	1.066	1.77	1.54	0.30	D	1.53	0.66	2.00	0.61
68	4	0.64	0.00	0.49	0.00	2.069	3.31	0.00	0.13	A	10.33	0.72	1.63	1.97
69	4	0.65	0.00	0.49	0.00	1.726	2.74	0.00	0.17	A	9.08	0.52	1.45	1.82
70	4	0.67	0.00	0.50	0.00	1.494	2.34	0.00	0.20	A	8.37	0.38	1.33	1.70
71	2	0.6	0.45	1.21	0.37	1.381	3.17	0.32	-1.61	C	12.35	0.00	1.47	4.93
72	2	0.6	0.34	1.22	0.28	1.153	2.65	0.29	-1.93	C	13.11	0.00	1.42	5.20
73	2	0.6	0.22	1.24	0.18	0.842	1.93	0.26	-2.75	C	14.32	0.00	1.37	5.63
74	2	0.6	0.21	1.24	0.17	0.974	4.02	0.22	-4.49	C	13.54	0.00	1.31	16.34
75	2	0.6	0.33	1.23	0.27	0.964	3.97	0.34	-4.49	C	12.10	0.00	1.32	14.77
76	2	0.6	0.44	1.23	0.36	1.203	4.96	0.37	-3.60	C	11.13	0.00	1.33	13.71
77	2	0.6	0.53	1.23	0.43	1.427	5.88	0.37	-3.05	C	10.48	0.00	1.35	12.94
78	2	0.6	0.64	1.24	0.52	2.069	8.53	0.31	-2.11	C	9.89	0.00	1.40	11.98
79	4	0.61	0.00	0.82	0.00	1.675	2.75	0.00	-0.26	A	12.27	0.08	1.29	2.64
80	4	0.62	0.00	1.03	0.00	1.307	2.14	0.00	-0.70	A	14.59	0.00	1.30	3.01
81	4	0.62	0.00	1.00	0.00	1.132	1.85	0.00	-0.75	A	13.62	0.00	1.25	2.85
82	1	0.67	1.56	0.28	5.52	1.365	2.15	1.14	0.65	B	1.76	0.96	2.08	0.60
83	1	0.64	1.66	0.77	2.14	2.151	5.80	0.77	-0.45	C	4.64	1.16	2.27	2.50
84	1	0.66	1.76	0.62	2.82	2.104	5.58	0.83	-0.26	C	3.44	1.35	2.31	1.72
85	1	0.6	1.71	0.60	2.84	2.012	6.77	0.85	-0.36	C	2.72	1.28	2.17	2.21
86	1	0.6	1.94	0.60	3.21	2.229	7.50	0.87	-0.33	C	2.73	1.49	2.39	2.17
87	1	0.6	1.87	0.70	2.67	2.286	7.69	0.82	-0.45	C	3.44	1.38	2.37	2.85
88	3.5	0.73	0.60	0.46	1.31	0.925	2.05	0.65	-0.02	A	2.92	0.34	1.18	1.38
89	3.5	0.74	0.67	0.43	1.53	1.007	2.21	0.66	0.04	A	2.85	0.43	1.26	1.23
90	3.5	0.61	0.82	0.63	1.30	1.572	2.52	0.52	-0.01	A	6.67	0.64	1.75	1.47
91	1.5	0.62	1.07	0.57	1.90	1.797	5.16	0.60	-0.26	A	3.92	0.90	1.72	2.36
92	1.5	0.83	0.93	0.46	2.05	1.695	5.94	0.55	-0.22	A	2.92	0.87	1.52	2.65

6 Bibliografia

Montuori, C (1968). Brusca immissione di una corrente ipercritica a tergo di altra preesistente. *Energia Elettrica*, XLV, 3 ,1-14.

Montuori, C. e Greco, V. (1973). Fenomeni di moto vario a valle di una paratoia piana. *Energia Elettrica*, L, 2 , 1-14.