



Agenzia Interregionale per il fiume Po



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Idraulica
Trasporti e Infrastrutture Civili
DITIC

**Studio su modello fisico dell'idrodinamica dei deflussi di piena
nel Fiume Po, in Comune di Casale Monferrato, nel tratto
a valle del ponte ferroviario. Località Nuova Casale**

Marzo 2005

Il responsabile della ricerca
Prof. Ing. Maurizio Rosso

Il Direttore del Dipartimento
Prof. Ing. Luca Ridolfi

Gli sperimentatori
Ing. Elena Cristofori
Enrico Petronio

I tecnici
Bonofiglio Francesco
Disabato Giuseppe

Relazione finale

RINGRAZIAMENTI

Lo scrivente porge un sentito ringraziamento al prof. Luigi Butera che, fino all'ultimo giorno del suo mandato da Direttore di Dipartimento, si è adoperato per giungere alla stipula del contratto di ricerca da cui trae origine il presente studio e che, per tutto il periodo di svolgimento delle prove sperimentali, ha sempre fornito preziosi consigli.

Un grazie particolare è dovuto agli "infaticabili" sperimentatori per la paziente e precisa attività di misura svolta, alla ditta Altavilla, realizzatrice del modello, sempre disponibile alla pronta esecuzione delle modifiche e integrazioni che si sono rese necessarie durante la prima fase del lavoro e ai tecnici di laboratorio che hanno sempre collaborato con entusiasmo sia alla costruzione che all'attività di misura.

SOMMARIO

1	GENERALITÀ.....	4
1.1	Realizzazione del modello.....	5
1.1.1	Parametri geometrici ed idraulici.....	5
1.1.2	Scabrezza del fondo.....	8
2	STUDIO IDRAULICO.....	12
2.1	Apparato di misura	12
2.2	Taratura del modello.....	14
2.3	Misure dei livelli idrici per le portate indicate dal P.A.I.	20
2.3.1	Portata $Q_{20} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$	21
2.3.2	Portata $Q_{100} = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$	25
2.3.3	Portata $Q_{200} = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$	28
2.3.4	Portata $Q_{500} = 6900 \text{ m}^3/\text{s}$	32
2.4	Livelli idrici indotti dal deflusso della portata dell'alluvione del 2000	35
2.4.1	$Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ - Argine golenale esistente-quote attuali	36
2.4.2	$Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ - Sovralzo arginale a quota argine maestro ..	41
2.4.3	$Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$	44
3	CONCLUSIONI.....	45

1 GENERALITÀ

L'Agenzia Interregionale per il Fiume Po (AIPO) ha incaricato la Sezione Idraulica del Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili del Politecnico di Torino, nella persona dello scrivente prof. ing. Maurizio Rosso, della realizzazione del modello fisico finalizzato allo studio dell'idrodinamica dei deflussi di piena del fiume Po in Casale Monferrato nel tratto che si estende a valle del ponte stradale in corrispondenza della località denominata Nuova Casale.

La necessità di realizzare un modello fisico per lo studio dei deflussi di piena emerse durante la Conferenza Programmatica convocata dalla Regione Piemonte in data 06.12.2002 presso il Comune di Casale Monferrato, ai sensi dell'art. 1bis della L. 365/2000, per esprimere parere sulla proposta regionale di integrazione delle previsioni del progetto di modificazione n. 1 del PAI.

Le prove sperimentali su modello hanno avuto lo scopo di verificare gli effetti indotti, sui deflussi delle acque di piena del fiume Po, dall'eventuale innalzamento e prolungamento dell'attuale argine golenale costruito a difesa del quartiere Nuova Casale situato in destra orografica a valle del ponte ferroviario.

In particolare è stato necessario individuare e quantificare quali fossero gli effetti, nelle sezioni poste a monte e in sinistra idrografica in corrispondenza dell'argine di Terranova, conseguenti all'innalzamento del tratto di argine golenale da adeguare in corrispondenza della località Nuova Casale.

Lo studio è stato condotto analizzando il comportamento idraulico del tratto d'asta fluviale considerato in conseguenza del deflusso delle seguenti portate:

- $Q_{20} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100} = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{200} = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{500} = 6900 \text{ m}^3/\text{s}$
(valori indicati nella direttiva piene di progetto del P.A.I.);
- $Q_{\text{ALLUVIONE1994}} = 6500 \text{ m}^3/\text{s}$ (valore rilevato alla stazione idrometrica di Casale in occasione dell'evento di piena del 1994 - *Risorse Idriche S.p.A.*, Giugno 2001 Elaborato 8);

- $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ (non contenuta nella fascia B), $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$ (contenuta nella fascia B) (valori ricavati dallo studio di progetto di integrazione al P.A.I. - *Risorse Idriche S.p.A.*, Giugno 2001 - eseguito per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Po a seguito dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000 - Elaborato 9.10).

1.1 Realizzazione del modello

1.1.1 Parametri geometrici ed idraulici

Il modello fisico è stato realizzato a fondo fisso con una struttura in legno rivestita in vetroresina ed è stato installato nei locali del Laboratorio di Idraulica del Politecnico di Torino.

La costruzione è avvenuta, riproducendo in opportuna scala la zona oggetto di studio e le strutture ivi presenti ed interferenti con il regolare deflusso delle acque, sulla base di un rilievo topografico di dettaglio fornito dall'AIPO e successivamente integrato da rilievi fatti eseguire direttamente dallo scrivente (**Figura 1, Foto 1**).

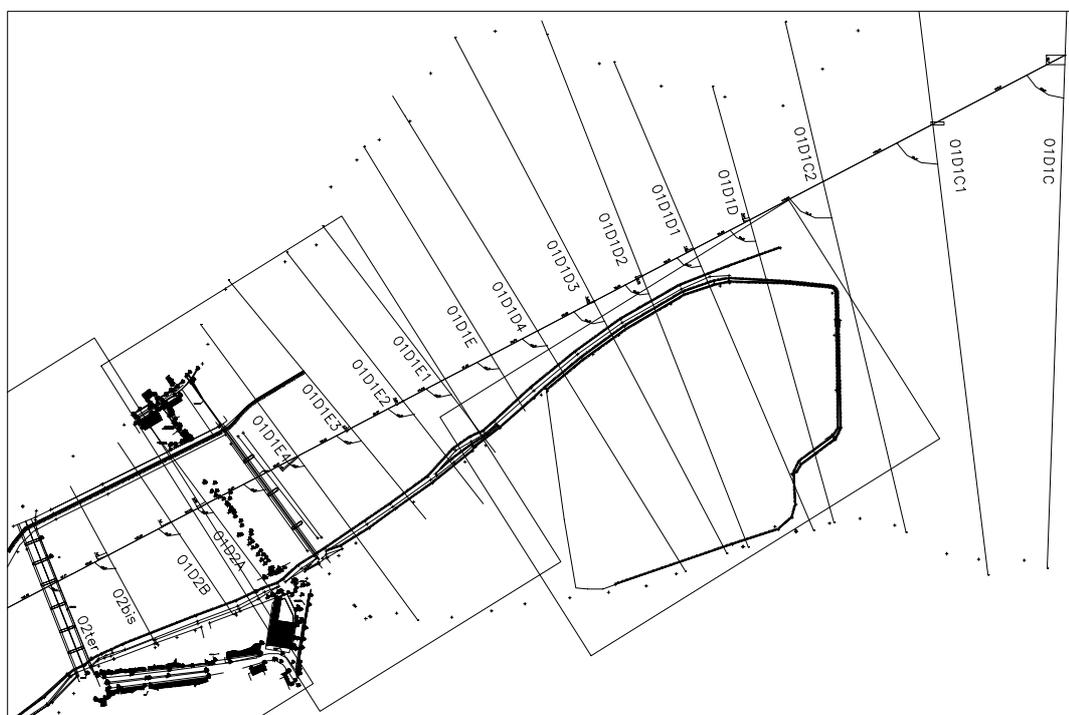


Figura 1: Planimetria della zona di studio

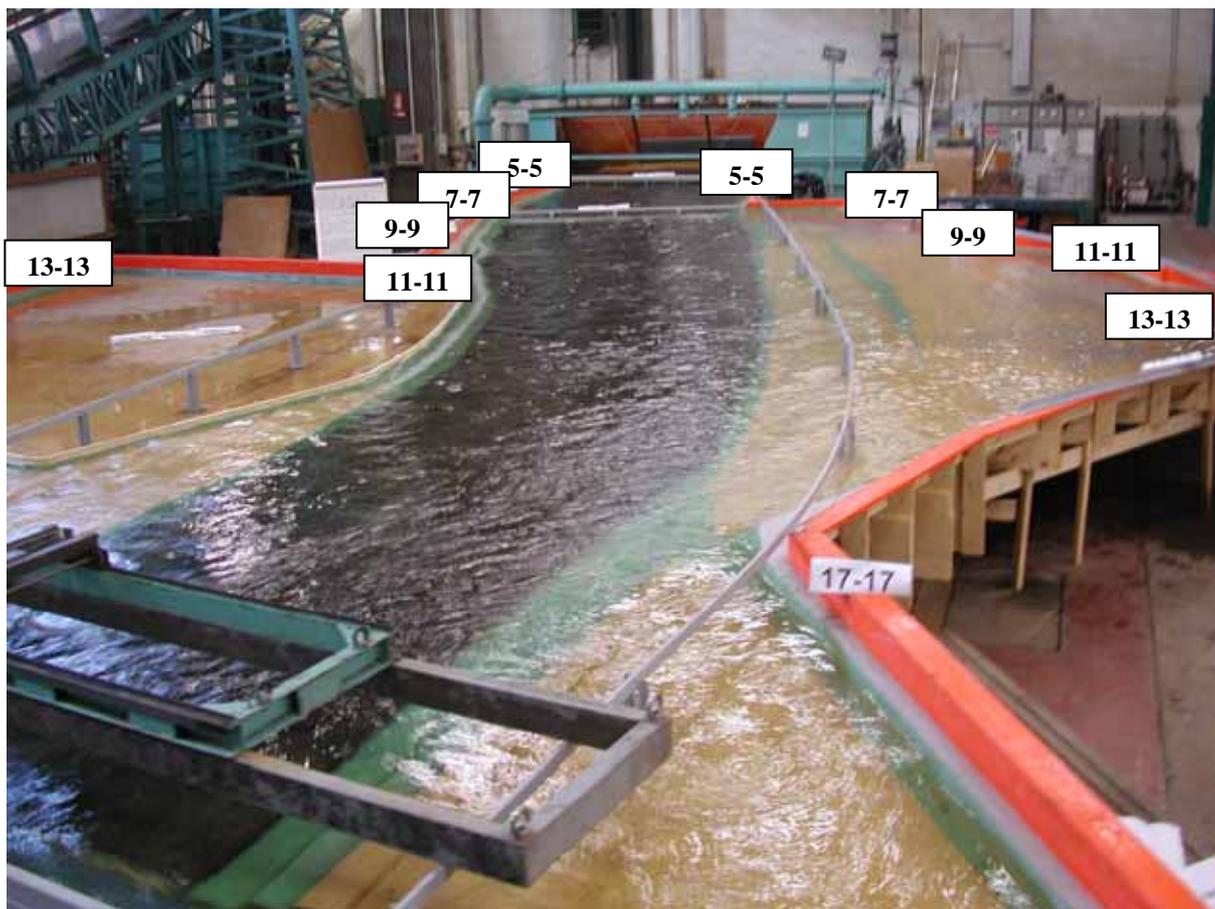


Foto 1: Vista di insieme del modello

La scelta della scala geometrica è scaturita dalla necessità di soddisfare i seguenti vincoli:

- l'estensione della zona di studio;
- il massimo valore di portata da simulare pari a: ($Q_{MAX}=7750m^3/s$);
- la massima superficie utile disponibile all'interno del laboratorio.

In base a queste considerazioni si è optato per una scala delle dimensioni planimetriche pari a 1:80. Per quanto riguarda le dimensioni altimetriche, che in scala 1:80 sarebbero risultate difficilmente analizzabili e misurabili, si è adottata invece una scala 1:40, in modo che, tra le due scale planimetrica ed altimetrica, ci fosse un rapporto di distorsione n pari a 2. In tal modo si sono ottenute, per una determinata area del modello, sezioni trasversali caratterizzate da profondità d'acqua maggiori con evidenti vantaggi per la misura dei livelli e delle velocità.

Tale assunzione comporta la corrispondenza, per esempio, della profondità media di 2 m del Po a Casale Monferrato con una profondità misurata sul modello di 0,05 m (5 cm).

Rispettando la similitudine di Froude, le altre scale risultano direttamente determinate dalle scale geometriche scelte, così come riportato nella seguente Tabella.

Grandezza	modello : realtà
Lunghezza x,y	1:80
altezza z	1:40
velocità v	1:6,32
portata Q	1:20.238

Tabella 1: Scale del modello

Il modello è stato alimentato mediante quattro pompe ognuna delle quali forniva una portata massima di 100 l/s; la portata massima di alimentazione è risultata quindi essere di 400 l/s, valore che corrisponde ad una portata di piena pari a circa 8000 m³/s quindi superiore al massimo valore che si desiderava analizzare ($Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$).

La condizione idraulica di valle è stata ottenuta regolando i livelli idrici nella sezione terminale del modello mediante l'utilizzo di due paratoie con le quali si sono parzializzate le sezioni di scarico simulando al meglio le condizioni di deflusso a valle del tratto di asta fluviale riprodotto su modello.

Allo stesso scopo, nell'area golenale situata in destra idrografica a valle della zona di Nuova Casale, è stato applicato uno strato in geosintetico sormontato da listelli di legno di altezza variabile, in funzione delle portate simulate, idonei a provocare un rallentamento della corrente in corrispondenza dell'ampia zona di scarico ove non si è ritenuto necessario installare ulteriori altre paratoie.

Riguardo alle caratteristiche del rivestimento di fondo e alle scabrezze utilizzate per realizzare la similitudine idraulica si rimanda al paragrafo successivo.

1.1.2 Scabrezza del fondo

Per individuare la tipologia di materiale da applicare come rivestimento del fondo alveo, è stato effettuato un apposito studio preliminare in modo da riprodurre al meglio la reale resistenza al moto opposta dal materiale litoide presente in alveo nel tratto di fiume Po considerato.

Il parametro di scabrezza da assegnare al modello è stato quindi valutato in seguito ad alcune campagne di misura e rilievi effettuati sul campo al fine di determinare la composizione granulometrica del materiale di fondo alveo. In seguito ad una attenta analisi geomorfologica del tratto di corso d'acqua oggetto di studio, per eseguire i campionamenti sono state individuate n°3 zone granulometricamente omogenee poste in prossimità del limite di sponda per oggettive difficoltà ad eseguire i prelievi nella zona centrale dell'alveo (**Foto 2**).



Foto 2: Punti di campionamento.

Tale scelta è supportata dal fatto che in occasione di piene considerevoli, le zone ove sono stati eseguiti i campionamenti, sono effettivamente interessate dal deflusso e considerati i tiranti idrici che vi si instaurano rappresentano di fatto la granulometria della superficie di fondo alveo.

La successiva fase di analisi granulometrica è stata basata sul Metodo della vagliatura integrato con quello dell'analisi "bloccometrica" proposto da Mancini, Fornaro e Altomare (1987). Questo secondo metodo consiste in un'analisi di fotografie, sufficientemente nitide, delle zone di prelievo ed in una assegnazione di

ogni elemento visibile ad una classe di dimensioni apparenti dalla quale viene poi dedotta la percentuale in volume relativa da assegnare ad ogni classe dimensionale del campione.

Operativamente, dopo averlo fotografato, è stato rimosso lo strato superficiale di ogni campione, costituito dalla frazione di materiale più grossolano. Sono quindi stati prelevati, dallo strato sottostante, n°3 campioni di peso circa 10 kg l'uno costituiti da materiale di diametro inferiore a 50 mm (Foto 3). L'analisi granulometrica per setacciatura a secco è stata effettuata imponendo come limite superiore $\Phi=30$ mm e come limite inferiore $\Phi=2$ mm.



Foto 3: Campioni di materiale di fondo alveo.

Per quanto riguarda il materiale più grossolano si è proceduto ad una elaborazione dei rilievi fotografici (Foto 4) seguendo la metodologia di Mancini et al. citata precedentemente.



Foto 4: Strato superficiale dei tre campioni.

La curva granulometrica complessiva risultante dall'elaborazione dei dati rilevati è riportata di seguito.

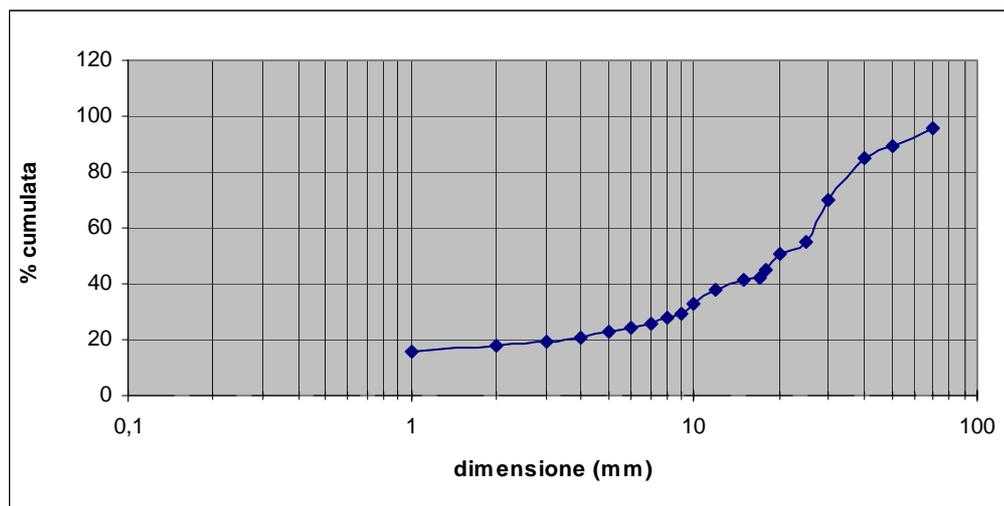


Figura2: Curva granulometrica complessiva dei campioni prelevati

Il valore del D_{90} risulta quindi essere pari a circa 60 mm mentre il valore del D_{50} è pari a 20 mm. Si stima quindi, utilizzando la relazione proposta da Garde e Ranga Raju, che il tratto di fiume considerato sia caratterizzato da un coefficiente di scabrezza di Strickler di circa $c=26m^{1/3}s^{-1}$.

Al fine di riprodurre correttamente nel modello gli effetti sulla resistenza al moto provocati dal materiale presente in alveo, si è deciso di applicare, sul fondo del modello stesso, una macroscabrezza costituita da una geostuoia in poliammide modello ITALGRIMP G-PA.

Sono dapprima state effettuate delle prove in canaletta rivestendo il fondo di un canale in plexiglass di sezione rettangolare 0,49x0,70 m con differenti spessori di geostuoia (8mm, 12mm, 18mm) (**Foto 5**), misurando successivamente i tiranti idrici al variare della portata in modo da calcolare, in funzione della stessa e della profondità della corrente, il coefficiente c di Strickler [$m^{1/3}/s$] caratteristico per ogni spessore di materiale utilizzato.

Sulla base della metodologia messa a punto, è emerso che la geostuoia di spessore 18 mm era quella che meglio si adattava alle portate ed ai tiranti idrici da simulare con gli esperimenti; in particolare, per le profondità oggetto di indagine, forniva nel modello una scabrezza pari a circa $34 m^{1/3}/s$ che corrisponde a circa $26 m^{1/3}/s$ nella realtà.



Foto 5: Canaletta utilizzata per determinare la scabrezza del fondo da assegnare al modello.

Riguardo alle modalità di posa della geostuoia sul fondo del modello, dopo numerose prove sperimentali eseguite con copertura del fondo alveo variabile, nella fase di taratura del modello (paragrafo 2.1) si è osservato che la migliore rappresentazione del deflusso reale si otteneva applicando la geostuoia uniformemente su tutta la superficie del fondo alveo inciso.

Riguardo alle aree golenali, si è invece verificato sperimentalmente in sede di taratura, che la naturale scabrezza fornita dalla vetroresina applicata sul fondo del modello, volutamente lasciata “scabra”, fosse sufficientemente rappresentativa per simulare in modo corretto la situazione reale.

2 STUDIO IDRAULICO

2.1 Apparato di misura

I livelli idrometrici z , relativi al deflusso delle varie portate sperimentate, sono stati misurati utilizzando un'asta idrometrica graduata in millimetri dotata di nonio ventesimale, montata su un coordinatometro x,y . La trave di supporto del coordinatometro è stata appoggiata su alcuni profilati metallici appositamente costruiti per realizzare un unico piano di riferimento orizzontale. L'orizzontalità del piano di riferimento è stata anche garantita da una accurata livellazione operata con strumento topografico di precisione. La trave di appoggio del coordinatometro è stata spostata da una sezione di misura all'altra per mezzo di un carro ponte che serve l'intera zona ove è stato collocato il modello (**Foto 6 e Foto 7**)



Foto 6: Apparato per la misura dei livelli idrometrici. Sono visibili i profilati di appoggio orizzontali, la trave di supporto, il coordinatometro e l'asta idrometrica.

Tra tutte le sezioni di rilievo fornite dall'Aipo si sono scelte le 10 più rappresentative e per ognuna di esse si sono rilevate sul modello, rispetto al riferimento locale, le quote di fondo con un passo trasversale di 0,15 m in alveo e 0,20

m in gola in modo da ricostruirne l'andamento geometrico con lo stesso sistema di riferimento su cui sono state successivamente effettuate le misure delle quote della superficie libera relative alle varie portate simulate.



Foto 7: Particolare del coordinatometro e dell'asta idrometrica utilizzata per la misura dei livelli idrometrici.

Il passo massimo di misura trasversale utilizzato per il rilievo della superficie libera della corrente è stato di 0,50 m.

In questo modo sono state ottenute le serie di coordinate x,z rispettivamente orizzontale (trasversale alla sezione) misurata con il coordinatometro e verticale misurata con l'asta idrometrica. Tutti i valori misurati sono graficamente riportati nelle tavole allegate ove per semplicità di lettura sono state riportate anche le quote medie della superficie libera. I valori dei franchi sono invece risultati come differenza

tra la quota degli argini e la quota puntuale della superficie libera, misurata in prossimità del rilevato arginale o della sponda incisa del corso d'acqua.

È utile sottolineare che un dislivello di 0,04 m (4 cm) nella realtà, corrisponde sul modello ad un dislivello di un solo millimetro.

2.2 Taratura del modello

La fase di taratura del modello è stata condotta riferendosi sia al valore di portata ricavato dalla scala di deflusso della stazione idrometrica di Casale Monferrato durante l'alluvione del 1994 pari a $Q_{1994} = 6500$, m³/s (Risorse Idriche S.p.A., Giugno 2001, Elaborato 8), sia ai valori della picchettatura eseguita durante lo stesso evento nelle sezioni poste alle progressive 8.108 km e 8.608 km (corrispondenti alle sezioni 13 e 17 del modello) ed alla progressiva 9.108 km posta immediatamente a valle della sezione 18 del modello.

Operativamente si è proceduto immettendo nel modello una portata di 321 l/s, corrispondente a 6500 m³/s reali, in modo che la superficie libera raggiungesse i due livelli idrici L1 ed L2 corrispondenti in scala ai livelli registrati durante la citata picchettatura eseguita durante la piena del 1994.

La quota del pelo libero misurata durante la piena del 1994 alla progressiva 9.108 km è stata utilizzata per impostare le condizioni idrauliche di valle nel modello mediante un'opportuna regolazione delle due paratoie di regolazione dello scarico situate in corrispondenza della sezione 18.

A conferma della corretta scelta della macroscabrezza utilizzata sul modello si può notare come, applicando il materiale geosintetico uniformemente su tutta la zona di fondo alveo inciso avendo cura di seguire al meglio la morfologia del fondo stesso, ed alimentando il modello con la portata $Q_{1994} = 6500$ m³/s, si sia ottenuta una ottima rappresentazione del deflusso reale e come i livelli idrici L1 ed L2, misurati

nel 1994, siano stati riprodotti fedelmente e con precisione sul modello (**Foto 9**, **Foto 10**).

È lecito dunque affermare che il modello rappresenta in modo soddisfacente i fenomeni idrodinamici che si instaurano nella zona oggetto di studio essendo in grado di riprodurre le reali condizioni di deflusso che si verificano nel tratto di fiume in esame.

La portata di piena del 1994 dà luogo infatti ad un deflusso che, pur interessando l'area golenale in sinistra idrografica, risulta interamente contenuto tra l'argine golenale posto in destra idrografica (foto 11, 12, 13), ove il franco arginale è di 0,24 m in sezione 11, di 0,40 m in sezione 12, di 0,39 m in sezione 14 e di 0,60 m in sezione 15, e l'argine maestro posto in sinistra idrografica (foto 14, 15, 16), ove il franco risulta essere di 1,04 m in sezione 11, 0,82 m in sezione 14 e 0,48 m in sezione 15.

A monte della sezione 11 il franco rispetto all'argine golenale in destra è di 0,90 m in sezione 9, 1,14 m in sezione 7, 0,75 m in sezione 5 ed a valle della sezione 15 il franco misurato e all'argine maestro in sinistra è superiore al metro (1,12 m in sezione 17 e 1,10 m in sezione 18).

Portata 6500 [m ³ /s]			
Sez 5		Sez 7	
sx	0,58	sx	1,60
dx	0,75	dx	1,14
Sez 9		Sez 11	
sx	0,49	sx	1,04
dx	0,90	dx	0,24
Sez 12		Sez 13	
sx	0,88	sx	1,20
dx	0,40	dx	0,56
Sez 14		Sez 15	
sx	0,82	sx	0,48
dx	0,39	dx	0,60
Sez 17		Sez 18	
sx	1,12	sx	1,10
dx	1,00	dx	1,20

Tabella 2: Franchi per $Q = 6500 \text{ m}^3/\text{s}$

In conclusione, immettendo nel modello la Q_{1994} , non si osserva alcun sormonto arginale, né in destra né in sinistra idrografica, e di conseguenza la zona di Nuova Casale non risulta in alcun modo interessata dal deflusso di piena, così come è

confermato da quanto realmente accadde in quei tragici giorni, anche se i franchi misurati su modello, come si evince dalla **Tabella 2**, risultano in molte sezioni inferiori al metro.



Foto 8: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.



Foto 9: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Livello L1 (rif. utilizzato per la taratura).



Foto 10: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Livello L2. (rif. utilizzato per la taratura).



Foto 11: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 11 in destra idrografica.



Foto 12: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ - Sezioni 11 - 14 in destra idrografica.

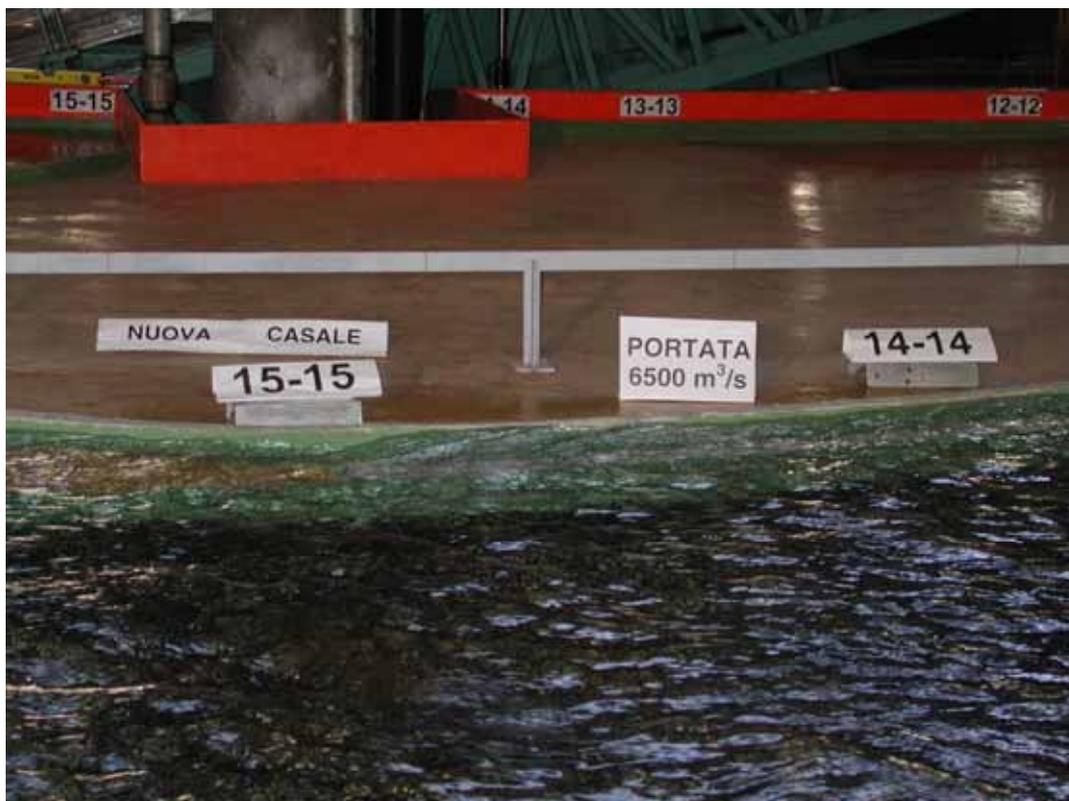


Foto 13: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ - Sezioni 14 - 15 in destra idrografica.

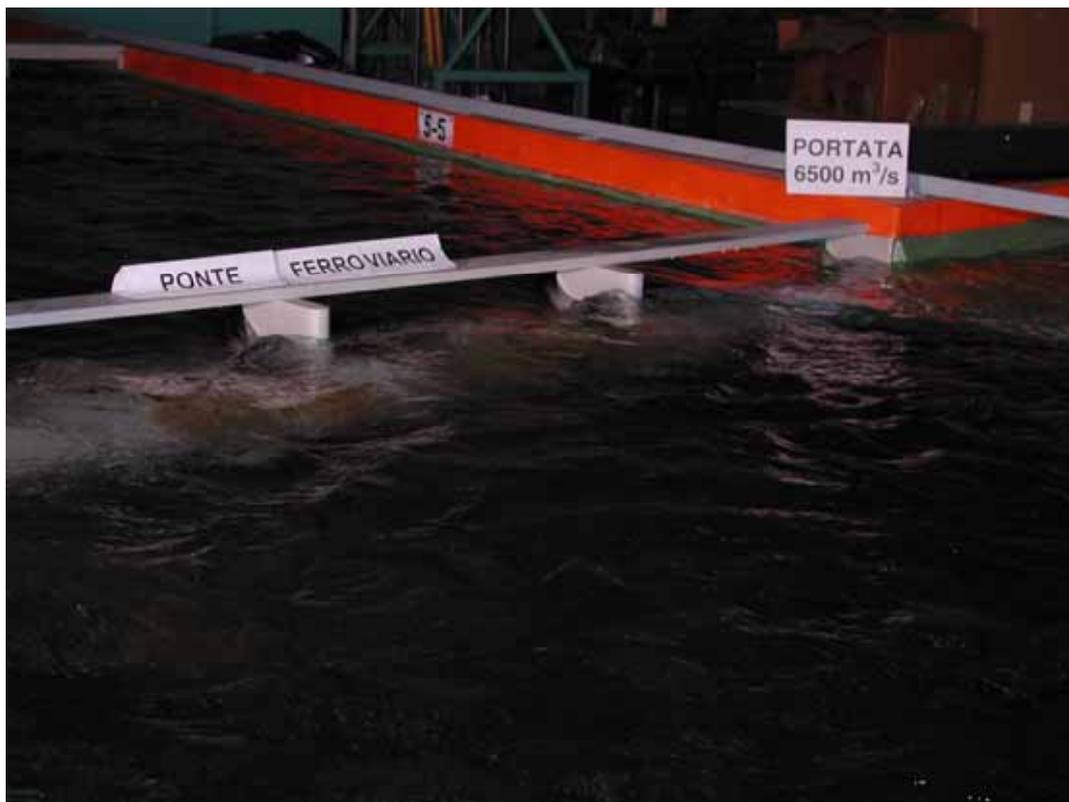


Foto 14: Portata $Q_{1994}=6500\text{m}^3/\text{s}$ – Sezione 5 in sinistra idrografica.



Foto 15: Portata $Q_{1994}=6500\text{m}^3/\text{s}$ – Sezioni 7 – 13 in sinistra idrografica.

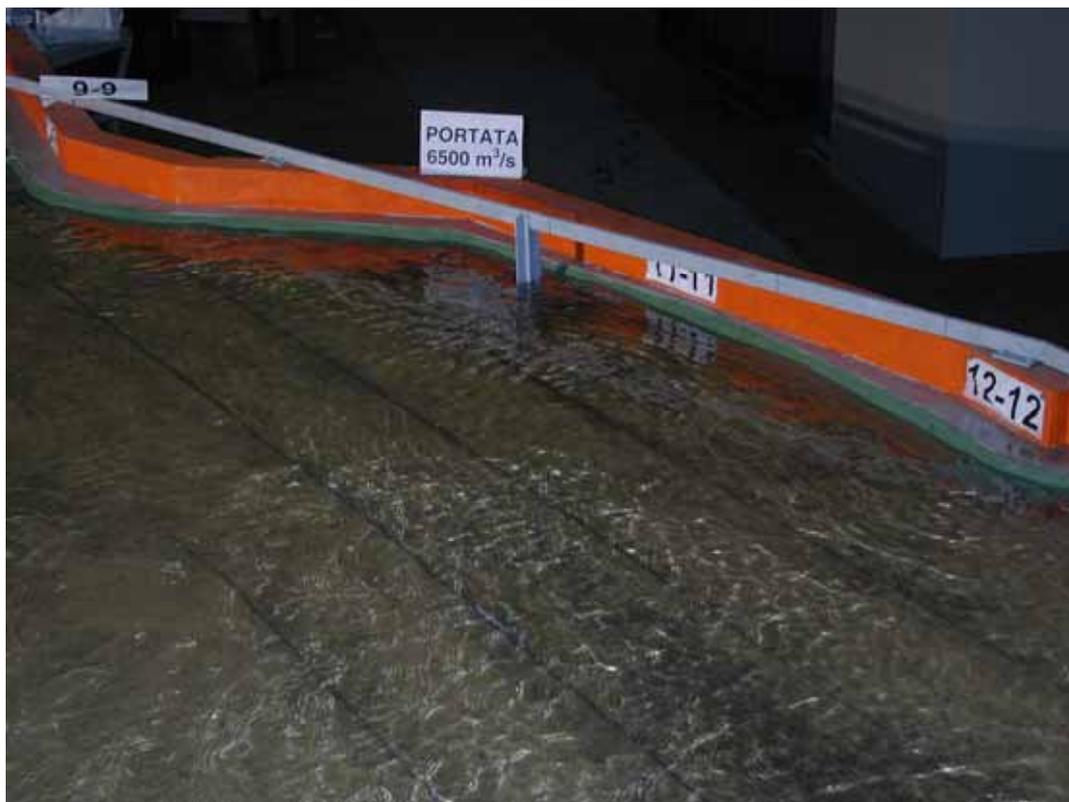


Foto 16: Portata $Q_{1994}=6500 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 12 in sinistra idrografica.

2.3 Misure dei livelli idrici per le portate indicate dal P.A.I.

Allo scopo di valutare l'idrodinamica della corrente nel tratto di fiume considerato, operata la taratura del modello sulla piena del 1994, sono state effettuate le misure dei livelli idrici corrispondenti al deflusso delle portate di piena previste dall'Allegato Tecnico al contratto stipulato con l'Agenzia interregionale per il Fiume Po corrispondenti a quelle indicate nella Direttiva Piene di Progetto del P.A.I. per i tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni:

- $Q_{20} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{100} = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{200} = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{500} = 6900 \text{ m}^3/\text{s}$

I livelli idrici conseguenti al deflusso di tali portate sono stati misurati per la sezione 5-5 posta tra il ponte stradale ed il ponte ferroviario e per le sezioni 7-7, 9-9, 11-11, 12-12, 13-13, 14-14, 15-15, 17-17, 18-18 poste a valle del ponte ferroviario.

In **Tabella 3** sono riportate le corrispondenze tra le sezioni indicate sul rilievo fornito da AIPO e le sezioni trasversali riportate sul modello:

Sezione	Sezione Rilievo
5-5	01D2B
7-7	01D1E4
9-9	01D1E2
11-11	01D1E
12-12	01D1D4
13-13	01D1D3
14-14	01D1D2
15-15	01D1D1
17-17	01D1C2
18-18	01D1C1

Tabella 3: Corrispondenza sezioni.

Viene riportata e commentata qui di seguito l'ampia documentazione fotografica riguardante il deflusso conseguente all'immissione nel modello delle quattro portate di piena citate.

2.3.1 Portata $Q_{20} = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 17: Portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.

Portata 4200 [m³/s]

Sez 5		Sez 7	
sx	3,12	sx	4,42
dx	3,29	dx	3,96
Sez 9		Sez 11	
sx	3,47	sx	3,87
dx	3,87	dx	3,32
Sez 12		Sez 13	
sx	3,85	sx	3,93
dx	3,22	dx	3,60
Sez 14		Sez 15	
sx	3,98	sx	4,50
dx	3,19	dx	3,63
Sez 17		Sez 18	
sx	4,93	sx	6,16
dx	4,71	dx	6,20

Tabella 4: Franchi per $Q = 4200 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ dà luogo, nella zona compresa tra il ponte stradale e quello ferroviario, ad un deflusso interamente contenuto nell'alveo inciso (**Foto 16 e 17**). La quota media della superficie libera è inferiore alla quota della prima banca arginale sia in destra che in sinistra idrografica e raggiunge un valore medio di circa 110 m s.l.m. tra le sezioni 5 e 7 (**Tavole 1 e 3**). Il franco, misurato rispetto alla sommità arginale, è di 3,29 m e 3,96 m in destra e 3,12 m e 4,42 m in sinistra rispettivamente nelle sezioni 5 e 7.

A valle del ponte ferroviario si nota come il deflusso interessi un primo tratto della zona golenale posta tra le sezioni 11 e 17 in sinistra orografica (foto19), e come in destra il livello idrico cominci a superare la prima banca arginale (foto 20).

In tale tratto il livello medio della superficie libera varia dai 109,24 m s.l.m. della sezione 11 ai 107,68 m della sezione 17 (**Tavole 7, 9, 11, 13, 15, 17**), mentre i valori del franco, riportati in dettaglio nella **Tabella 4**, variano da 3,32 m della sezione 11 a 4,71 m della sezione 17 in destra e da 3,87 m della sezione 11 a 4,93 m della sezione 17 in sinistra.

A valle della sezione 17 il deflusso interessa esclusivamente l'alveo inciso.



Foto18: Portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sez. 5-5 e 7-7 in destra idrografica.



Foto19: Portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sez. 5-5 e 7-7 in sinistra idrografica.

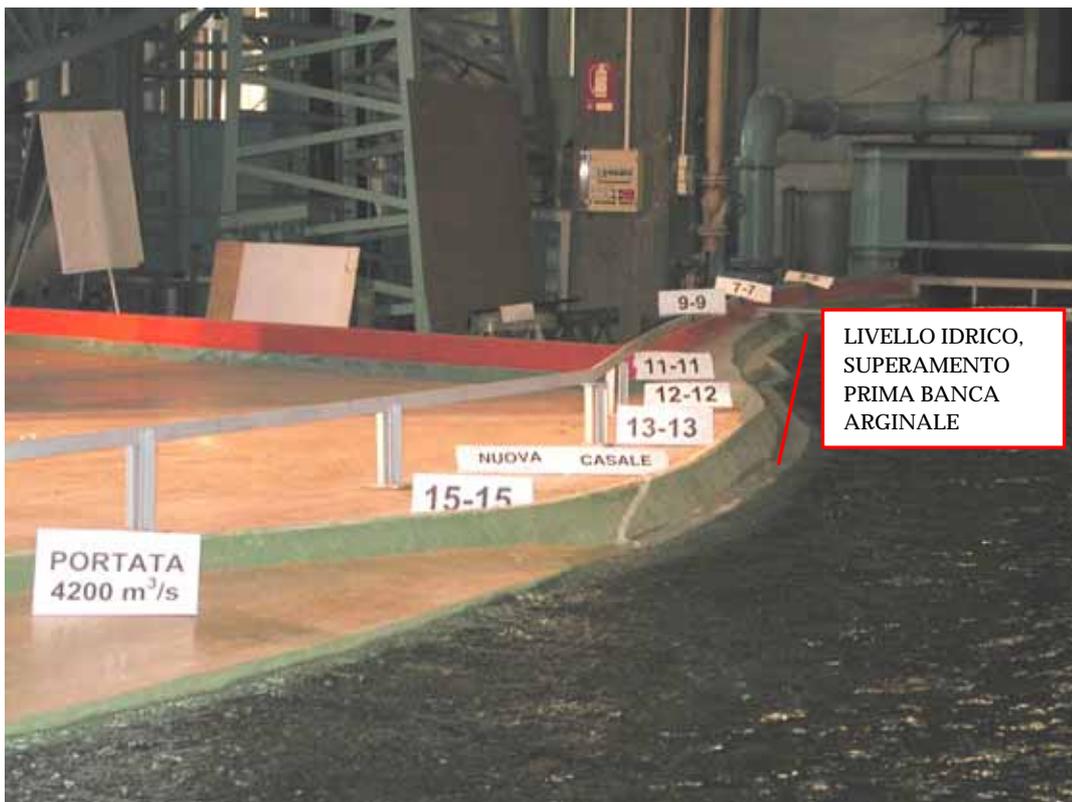


Foto 20: Portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista argine in destra idrografica.



Foto 21: Portata $Q_{20}=4200 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sez. 11-11 – 15-15 in sinistra idrografica.

2.3.2 Portata $Q_{100} = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$

Immettendo la portata $Q_{100}=5600\text{m}^3/\text{s}$ si osserva come il deflusso, pur essendo ampiamente contenuto tra l'argine golenale in destra idrografica e l'argine maestro in sinistra, interessi sia la golena posta in sinistra idrografica tra le sezioni 7 e 15, sia la golena, in destra idrografica, posta a valle della sezione 15. I livelli idrici sono compresi tra i 111,11 m s.l.m., in corrispondenza della sezione 5, (**Tavola 1**), i 109,95 m s.l.m. della sezione 14 (tavola 13), e i 108,37 m s.l.m. della sezione 17 (**Tavola 17**).

In tutte le sezioni il valore del franco, misurato rispetto alla sommità dell'argine golenale in destra idrografica, è sempre maggiore di 1,75 m e quello misurato rispetto alla sommità dell'argine maestro in sinistra è sempre maggiore di 1,94 m.

Le velocità della corrente sono comprese tra 2 e 4,50 m/s dalla sezione 5 fino alla sezione 14 (**Tavole 1, 5, 13**).



Foto22: Portata $Q_{100}=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.

Portata 5600 [m³/s]

Sez 5		Sez 7	
sx	1,94	sx	3,24
dx	2,11	dx	2,78
Sez 9		Sez 11	
sx	2,37	sx	2,61
dx	2,77	dx	2,06
Sez 12		Sez 13	
sx	2,55	sx	2,66
dx	1,92	dx	2,33
Sez 14		Sez 15	
sx	2,63	sx	2,62
dx	1,84	dx	1,75
Sez 17		Sez 18	
sx	3,75	sx	4,09
dx	4,15	dx	4,05

Tabella 5: Franchi per $Q = 5600 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto23: Portata $Q_{100}=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in destra orografica.

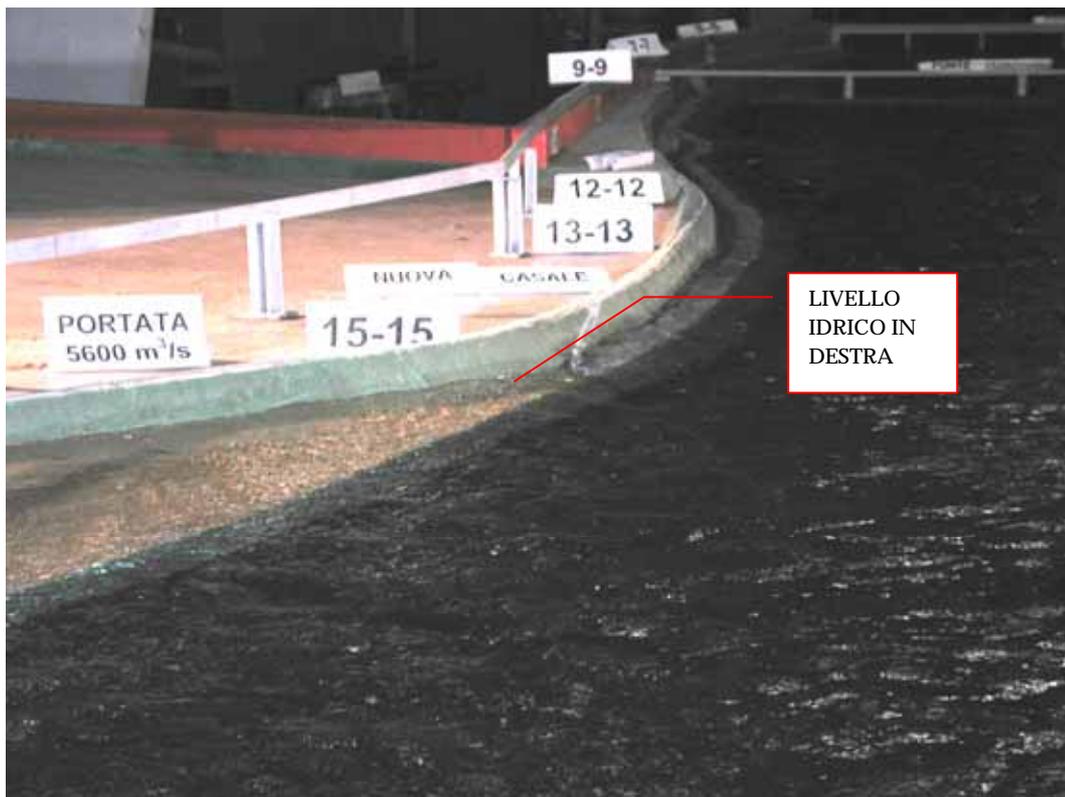


Foto24: Portata $Q_{100}=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 15 in destra orografica.

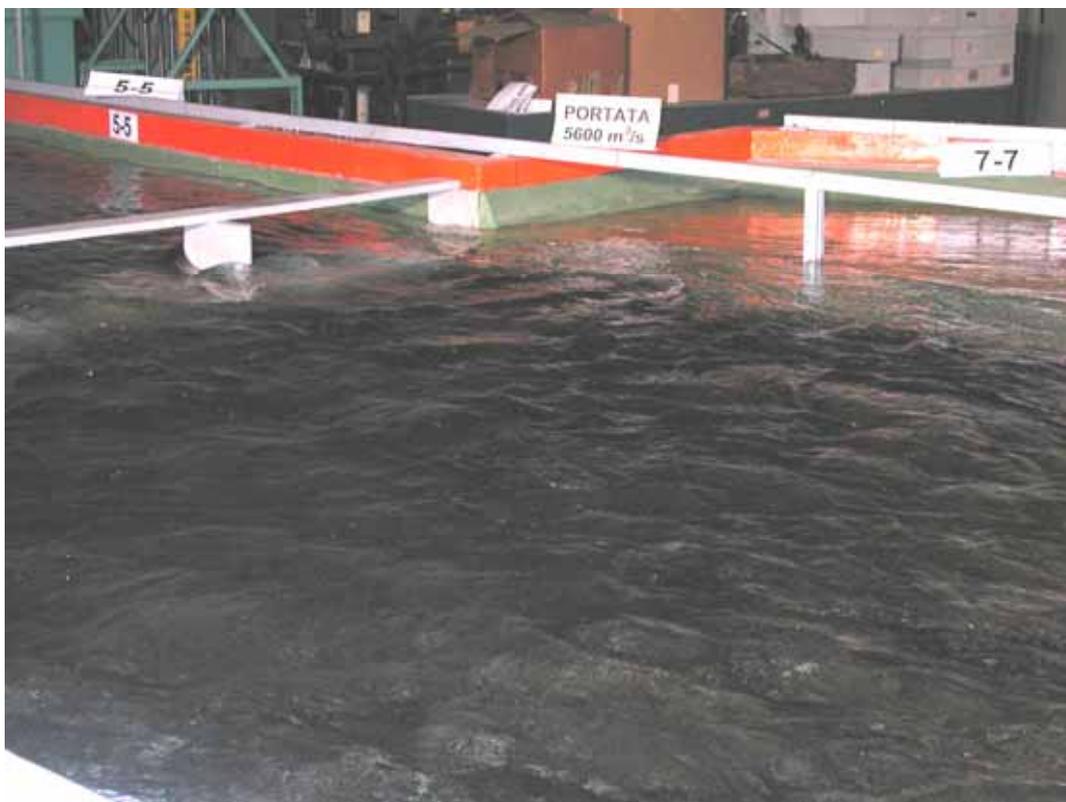


Foto25: Portata $Q_{100}=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in sinistra orografica.

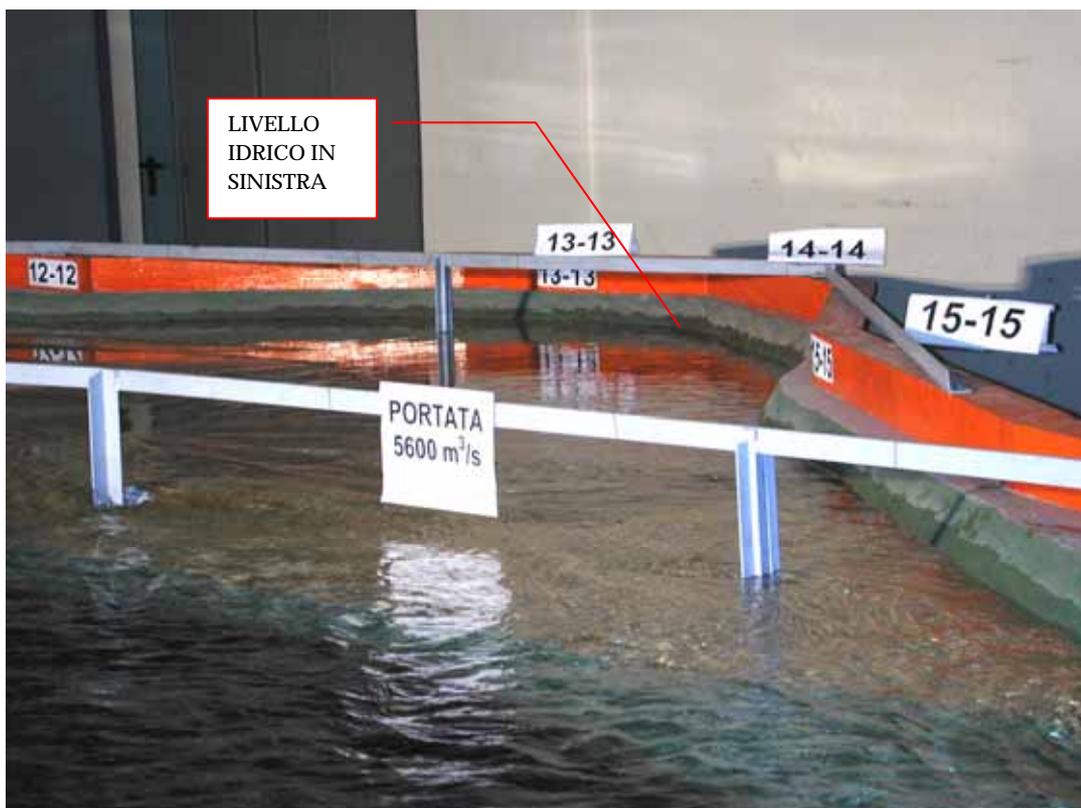


Foto26: Portata $Q_{100}=5600 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 12 – 15 in sinistra orografica.

2.3.3 Portata $Q_{200} = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$

Il deflusso della portata con tempo di ritorno 200 anni ($Q_{200} = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$) determina ovviamente un incremento dei livelli idrici. Il valore del franco arginale in destra risulta essere in generale maggiore di 1 m, tranne che nelle sezioni 12 e 14 ove si misurano valori di 0,84 m e 0,96 m rispettivamente (Foto 27 e Foto 29). In sinistra idrografica i franchi sono sempre maggiori di un metro con un minimo di 1,08 m in sezione 5 ed un massimo di 2,03 m in sezione 7.

Le quote del pelo libero si mantengono su valori medi che vanno da 111,97 m s.l.m. in corrispondenza della sezione 5 (**Tavola 1**), a 110,56 m s.l.m. per la sezione 17 (**Tavola 17**).

Le velocità della corrente misurate in corrispondenza della sezione 5 sono comprese tra 2,90 m/s e 3,86 m/s (**Tavola 1**) mentre per la sezione 14 sono tra 3,22 m/s e 4,34 m/s (**Tavola 13**).



Foto 27: Portata $Q_{200}=6100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.

Portata 6100 [m³/s]

Sez 5		Sez 7	
sx	1,08	sx	2,03
dx	1,25	dx	1,57
Sez 9		Sez 11	
sx	1,07	sx	1,48
dx	1,47	dx	1,00
Sez 12		Sez 13	
sx	1,52	sx	1,54
dx	0,84	dx	1,21
Sez 14		Sez 15	
sx	1,32	sx	1,20
dx	0,96	dx	1,40
Sez 17		Sez 18	
sx	1,88	sx	1,74
dx	1,64	dx	1,78

Tabella 5: Franchi per $Q = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto28: Portata $Q_{200}=6100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in destra orografica.



Foto29: Portata $Q_{200}=6100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 15 in destra orografica.



Foto 30: Portata $Q_{200}=6100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in sinistra orografica.



Foto31: Portata $Q_{200}=6100 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 13 in sinistra orografica.

2.3.4 Portata $Q_{500} = 6900 \text{ m}^3/\text{s}$

La portata con tempo di ritorno 500 anni, $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$, determina il deflusso di una corrente che rimane ancora contenuta tra l'argine golenale posto in destra idrografica e l'argine maestro posto in sinistra. In queste condizioni, tuttavia, il franco misurato rispetto alla sommità dell'argine golenale in destra è ridotto a pochi centimetri nelle sezioni 11 e 12 (0,12 m) e nella sezione 14 (0,08 m). I franchi rispetto alla sommità dell'argine maestro di Terranova si riducono anche in sinistra idrografica raggiungendo il limite inferiore 0,20 m in corrispondenza della sezione 15 e valori molto ridotti anche in corrispondenza delle sezioni 5, 9, 12, 13 e 14 ove misurano rispettivamente 0,35 m, 0,38 m, 0,60 m, 0,56 m e 0,32 m.

I valori misurati in tutte le sezioni di indagine sperimentale sono riportati in dettaglio nella **Tabella 6**.



Foto32: Portata $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.

Portata 6900 [m³/s]

Sez 5		Sez 7	
sx	0,35	sx	1,39
dx	0,52	dx	0,93
Sez 9		Sez 11	
sx	0,38	sx	0,72
dx	0,78	dx	0,12
Sez 12		Sez 13	
sx	0,60	sx	0,56
dx	0,12	dx	0,23
Sez 14		Sez 15	
sx	0,32	sx	0,20
dx	0,08	dx	0,24
Sez 17		Sez 18	
sx	1,12	sx	1,00
dx	0,92	dx	1,05

Tabella 6: Franchi $Q_{200}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$.

In particolare si può osservare che in destra il deflusso è critico in corrispondenza delle sezioni 11, 12, 14 (**Foto 34**), mentre in sinistra la situazione più critica si osserva in corrispondenza della sezione 15 così come documentato dalla **Foto 36**. In sintesi, secondo le risultanze degli esperimenti eseguiti, il deflusso della portata con tempo di ritorno cinquecentennale Q_{500} , non determina alcun sormonto né dell'argine golenale in destra, né dell'argine maestro in sinistra idrografica.

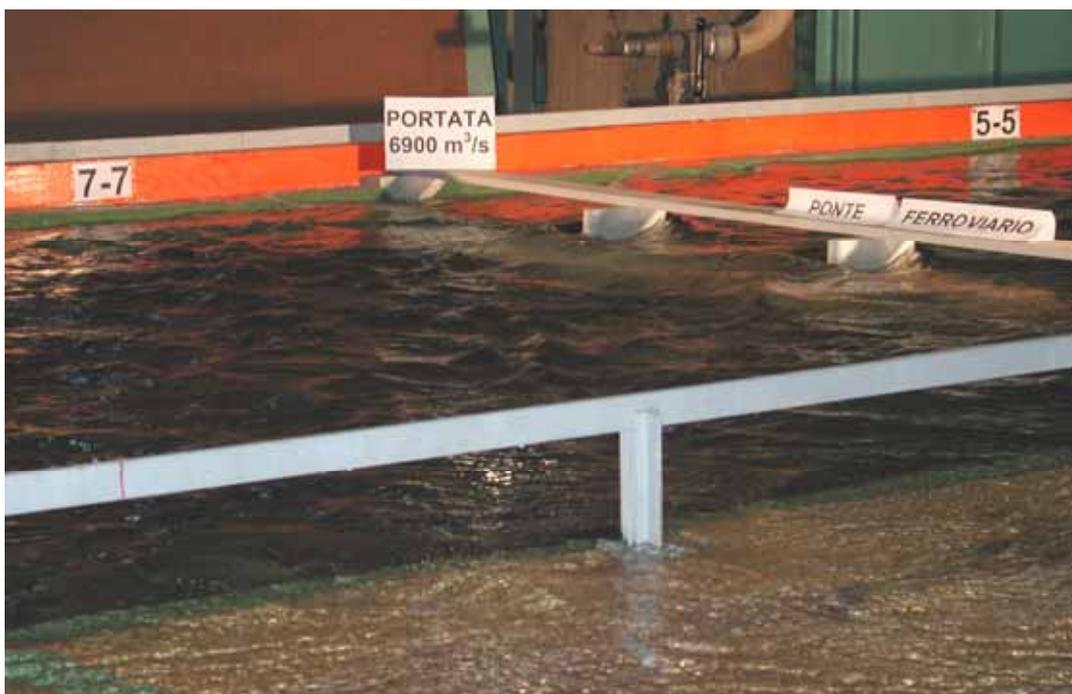


Foto33: Portata $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sez. 5 e 7 in destra idrografica.

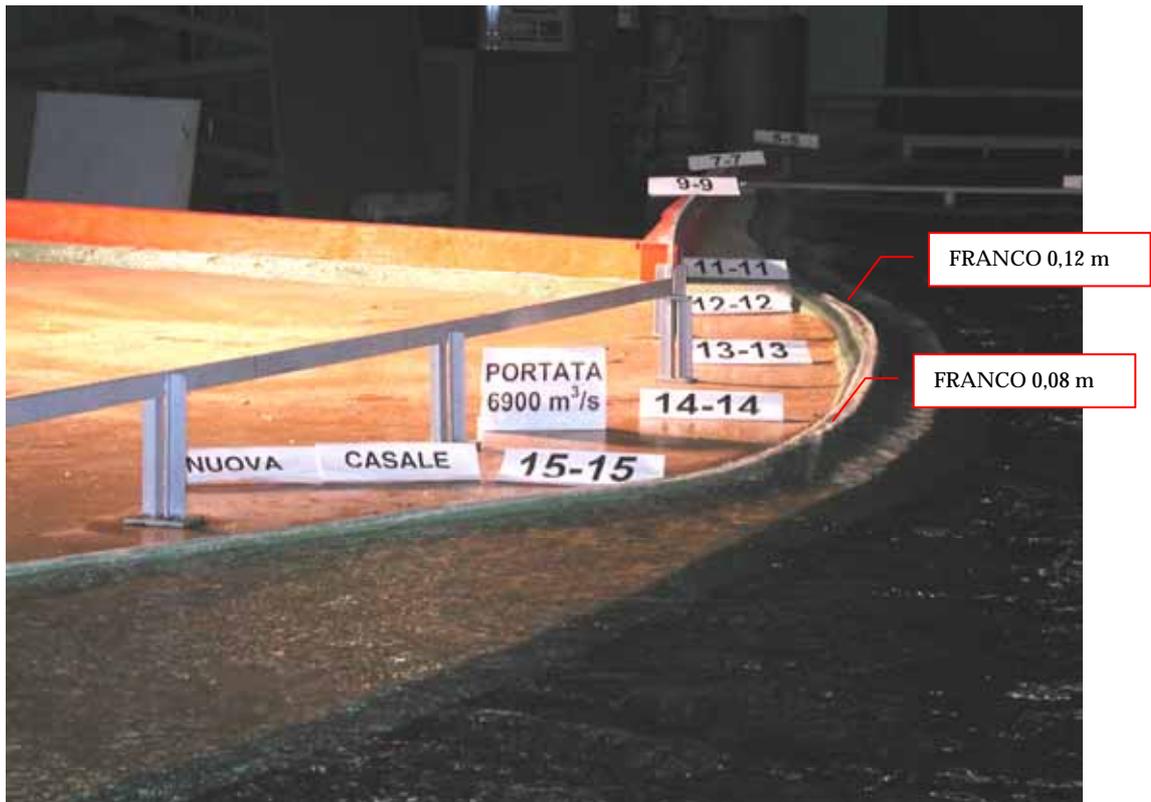


Foto34: Portata $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sezioni 9 - 15in destra idrografica.



Foto35: Portata $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sez. 5 e 7 in sinistra idrografica.

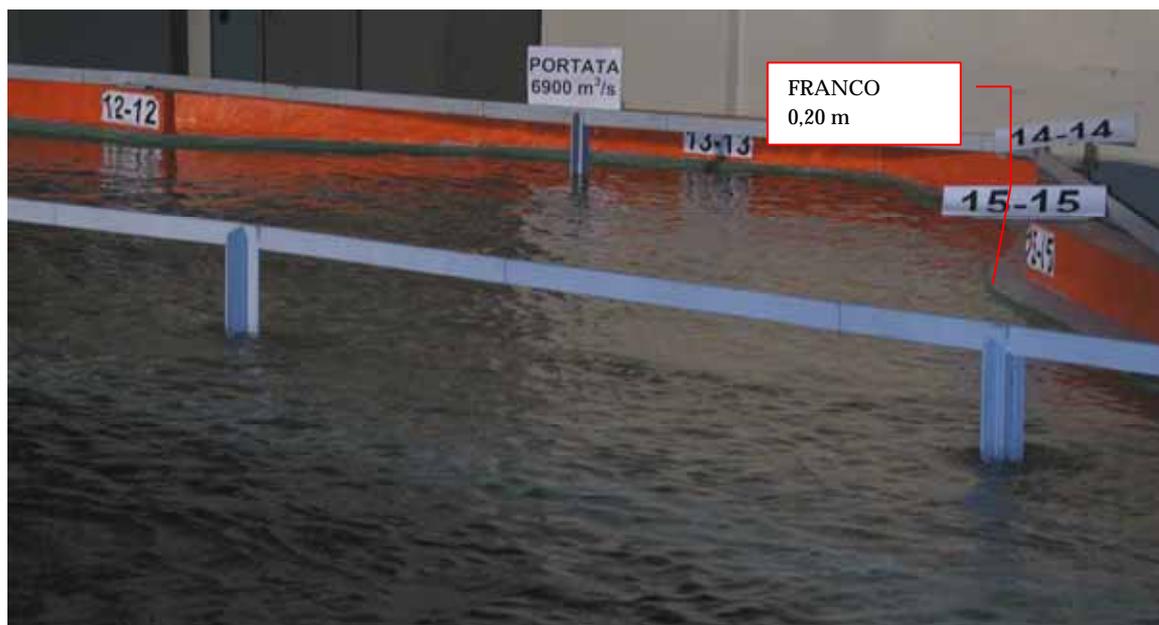


Foto36: Portata $Q_{500}=6900 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista sezioni 12 – 15 in destra idrografica.

2.4 Livelli idrici indotti dal deflusso della portata dell'alluvione del 2000

Per l'analisi dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000 si è fatto riferimento alle portate ricavate dallo studio di progetto di integrazione al P.A.I. eseguito dalla Società Risorse Idriche per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Po:

$Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ (non contenuta nella fascia B),

$Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$ (contenuta nella fascia B).

Sono stati misurati in un primo tempo i livelli indotti dal deflusso della portata $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ verificando, con la configurazione altimetrica degli attuali argini, in quali sezioni si manifestassero sormonti ed esondazioni.

Successivamente è stato innalzato l'argine golenale in destra idrografica, posto a difesa del quartiere Nuova Casale, adeguandolo, sezione per sezione, alle quote dell'argine maestro in destra idrografica (Foto 37).

Le prove sperimentali hanno avuto lo scopo di misurare gli eventuali incrementi di livello di superficie libera e le variazioni di velocità della corrente, conseguenti all'adeguamento arginale al fine di verificarne la reale fattibilità.

Le misure di livello idrico e di velocità sono state eseguite in particolare nelle sezioni prospicienti il tratto di argine innalzato ed in corrispondenza dell'argine di Terranova posto sulla sponda opposta in sinistra orografica.



Foto 37: Innalzamento dell'argine golenale in località Nuova Casale.

Nei paragrafi che seguono sono riportati i risultati delle misure sperimentali eseguite e la relativa documentazione fotografica che rappresenta le condizioni di deflusso della portata $Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ ossia quella non contenuta a monte nella fascia B.

2.4.1 $Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ - Argine golenale esistente-quote attuali

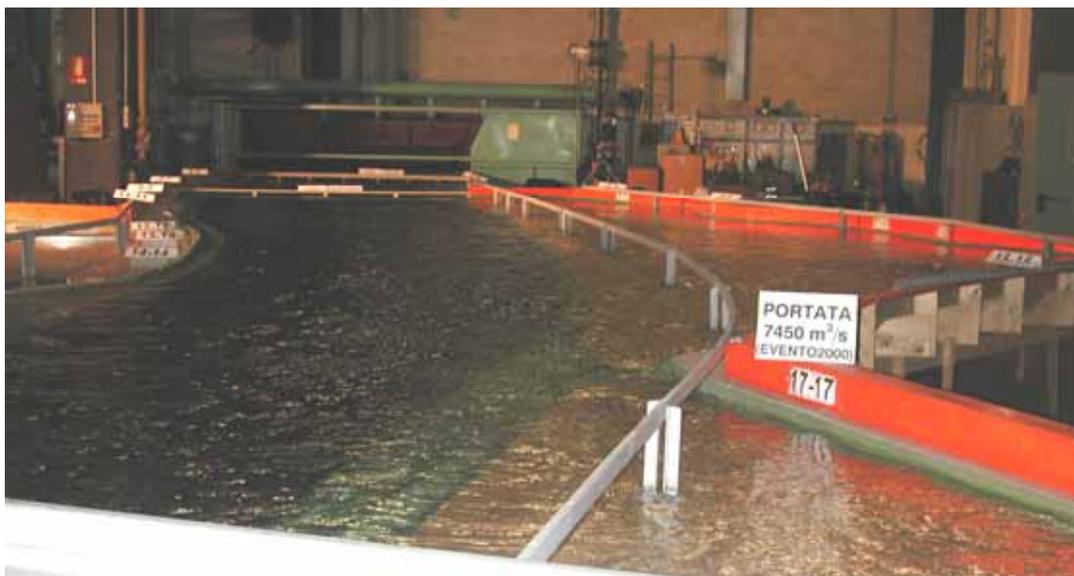


Figura 38: Portata $Q_{\text{Alluvione2000}}=7450 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme

La simulazione del deflusso della piena occorsa nell'ottobre 2000 ha consentito di osservare come nel tratto compreso tra la sezione 5 e la sezione 9 la portata defluente sia contenuta tra l'argine golenale in destra idrografica e l'argine maestro in sinistra e non determini alcun sormonto arginale. Il franco, misurato rispetto alla sommità degli argini, è risultato di 0,22 m in sinistra e di 0,39 m in destra in corrispondenza della sezione 5, di 1,11 m in sinistra e di 0,65 m in destra nella sezione 7, 0,29 m in sinistra e 0,70 m in destra in nella sezione 9.

Procedendo dalla sezione 11 verso valle, in destra idrografica si manifesta un sormonto dell'arginale golenale posto a protezione di Nuova Casale provocando quindi il parziale allagamento della zona stessa (**Foto 40**). In particolare i livelli idrici superano la quota della sommità dell'argine golenale di circa 0,04 m nella sezione 11, di 0,03 m nella sezione 12, di soli 0,01 m nella sezione 14 lambendo appena la sommità arginale nella sezione 15. A valle nella sezione 17, sempre in destra orografica, il franco arginale è di circa 0,61 m.

In sinistra si registra l'annullamento del franco dell'argine di Terranova (0,00 m) in corrispondenza della sezione 15 (**Foto 42**). Il franco arginale è, sempre in sinistra, di 0,64 m nella sezione 11, 0,43 m nella sezione 12, 0,25 m nella 13, 0,22 m nella sezione 14 e 0,83 m nella sezione 17.

I risultati delle misure eseguite sono sintetizzati nella **Tabella 7** nella quale sono anche riportati i risultati relativi alle prove sperimentali eseguite dopo l'adeguamento delle quote dell'argine golenale a quelle dell'argine maestro.

Le velocità misurate in conseguenza del deflusso della portata ($Q = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$) immessa nel modello della portata in esame, variano da 3,54 m/s a 4,18 m/s nella sezione 5 e 9 (alveo inciso) e sono dell'ordine di 1-2 m/s per l'area golenale in sinistra idrografica (**Tavole 2, 6, 10 e 14**).

Il livello medio raggiunto dalla corrente é di 112,83 m s.l.m. nella zona compresa tra il ponte stradale e quello ferroviario (sezione 5, **Tavola 2**) e di circa 112 m s.l.m. a valle del ponte ferroviario in corrispondenza della sezione 14 (**Tavole 4, 6, 8, 10,12, 14, 16**).

Portata 7450 [m³/s]

Sez 5		Sez 7		Sez 9	
sx	0,22	sx	1,11	sx	0,29
dx	0,39	dx	0,65	dx	0,70
Sez 11	Senza sovrалzo	Sez 11	Con sovrалzo		
sx	0,64	sx	0,60		
dx	-0,04	dx	-0,12		
Sez 12	Senza sovrалzo	Sez 12	Con sovrалzo		
sx	0,43	sx	0,32		
dx	-0,03	dx	-0,08		
Sez 13	Senza sovrалzo	Sez 13	Con sovrалzo		
sx	0,25	sx	0,24		
dx	0,14	dx	0,00		
Sez 14	Senza sovrалzo	Sez 14	Con sovrалzo		
sx	0,22	sx	0,12		
dx	-0,01	dx	-0,08		
Sez 15	Senza sovrалzo	Sez 15	Con sovrалzo		
sx	0,00	sx	-0,04		
dx	0,00	dx	-0,15		
Sez 17		Sez 18			
sx	0,83	sx	0,55		
dx	0,61	dx	0,84		

Tabella 7: Franchi relativi alla $Q_{\text{Alluvione2000}}=7450 \text{ m}^3/\text{s}$. (situazione attuale e post innalzamento arginale). I franchi sono riferiti sezione per sezione alla sommità dell'argine golenale in destra e di quello maestro in sinistra. (Il segno - indica una quota superiore alla sommità degli attuali argini).

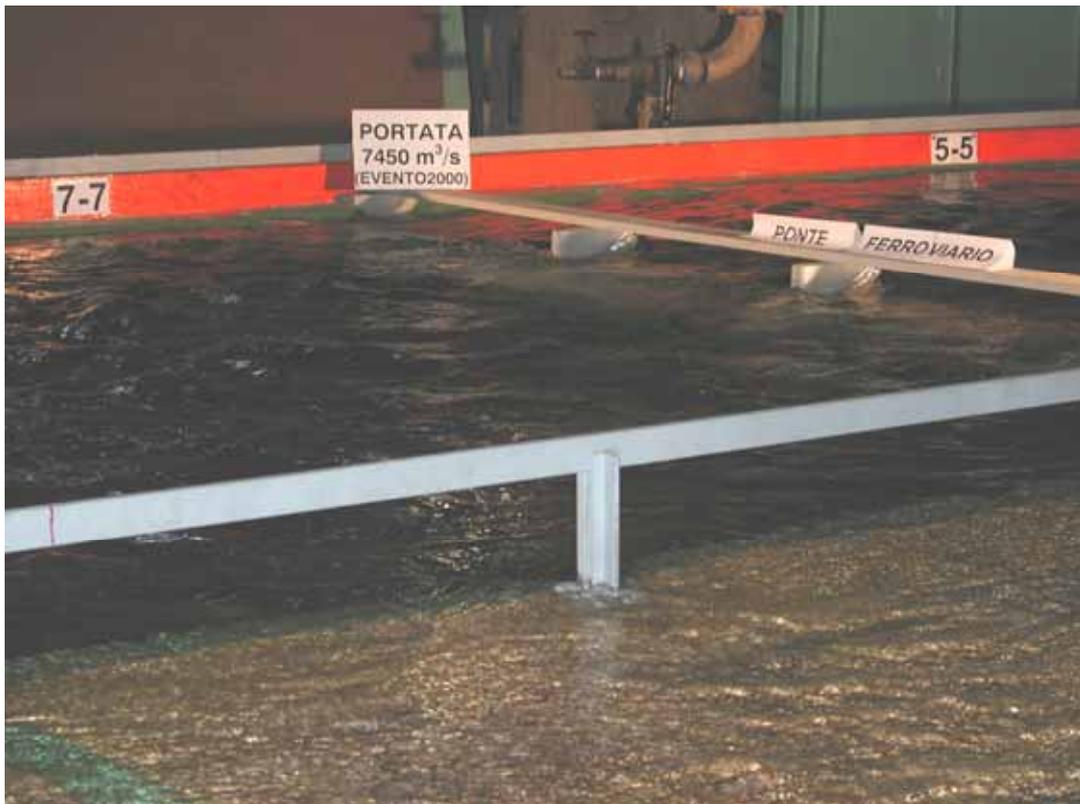


Figura 39: Portata $Q_{2000}=7450 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in destra orografica.



Figura 40: Portata $Q_{2000}=7450 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 11 – 15 in destra orografica.



Figura 41: Portata $Q_{2000}=7450\text{m}^3/\text{s}$ – Sezioni 7 – 12 in sinistra orografica.



Figura 42: Portata $Q_{2000}=7450\text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 14 – 15 in sinistra orografica.

2.4.2 $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ – Sovralzo arginale a quota argine maestro

Sono di seguito riportati i risultati delle misure eseguite per analizzare l'effetto, sul deflusso della portata $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$, del sovrалzo arginale “costruito” tra le sezioni 7 e 17 al fine di adeguare l'argine golenale esistente alla quota dell'argine maestro in destra idrografica.

Le prove sperimentali condotte hanno consentito di osservare che l'innalzamento dell'argine è di dimensione sufficiente per consentire, senza esondazioni, il deflusso della portata occorsa nell'ottobre 2000 che, purtroppo, in occasione di tale evento provocò invece l'allagamento del quartiere Nuova Casale (**Foto 43**).

Nel tratto di fiume compreso tra la sezione 5 e la sezione 9 non sono state evidenziati di fatto cambiamenti delle condizioni di deflusso della portata di piena rispetto a quelli relativi alla situazione attuale sia in termini di livelli idrici della sia di velocità della corrente.

Nella sezione 11 e nelle successive di valle a causa del sovrалzo arginale si manifesta invece un modesto incremento delle quote della superficie libera.

In particolare riferendosi alle **Tavole 8, 10, 12, 14, 16** relativamente alle sezioni 11, 12, 13, 14 e 15, si può osservare che con la realizzazione del sovrалzo arginale i livelli idrici in sinistra idrografica risultano maggiori rispetto alla situazione senza sovrалzo, di circa 0,04 m nella sezione 11 e 15, 0,11 m nella sezione 12, praticamente invariato nella sezione 13, di 0,10 m nella sezione 14; rimangono invece del tutto invariati i livelli nelle sezioni 17 e 18. In tutte le sezioni, esclusa la sezione 7 ove il franco è di 1,11 m, i franchi arginali risultano ampiamente inferiori al metro anche se nella sola sezione 15 si ha il parziale sormonto dell'argine. Va comunque osservato che la sezione 15 anche senza la presenza del sovrалzo arginale manifestava già per la stessa portata una criticità in quanto vedeva annullarsi il franco.

In destra idrografica il deflusso in presenza dell'innalzamento arginale non determina variazioni di livello in corrispondenza delle sezioni 5, 7 e 9 e mentre comporta lievi incrementi di livello idrico in corrispondenza delle sezioni dalla 11 alla 15 dove si registrano incrementi di livello pari a 0,08 m nella sezione 11, 0,05 m nella

sezione 12, 0,14 m nella sezione 13, 0,07 m nella sezione 14 e 0,15 m nella sezione 15. I franchi arginali, sempre riferiti per uniformità alle quote attuali dell'argine golenale sono riportati in dettaglio nella **Tabella 7**.

Per quanto riguarda le velocità della corrente, le variazioni di livello non sono tali da determinare variazioni apprezzabili in alcuna sezione.



Figura 43 : Portata $Q_{2000}=7450 \text{ m}^3/\text{s}$ – Vista d'insieme.

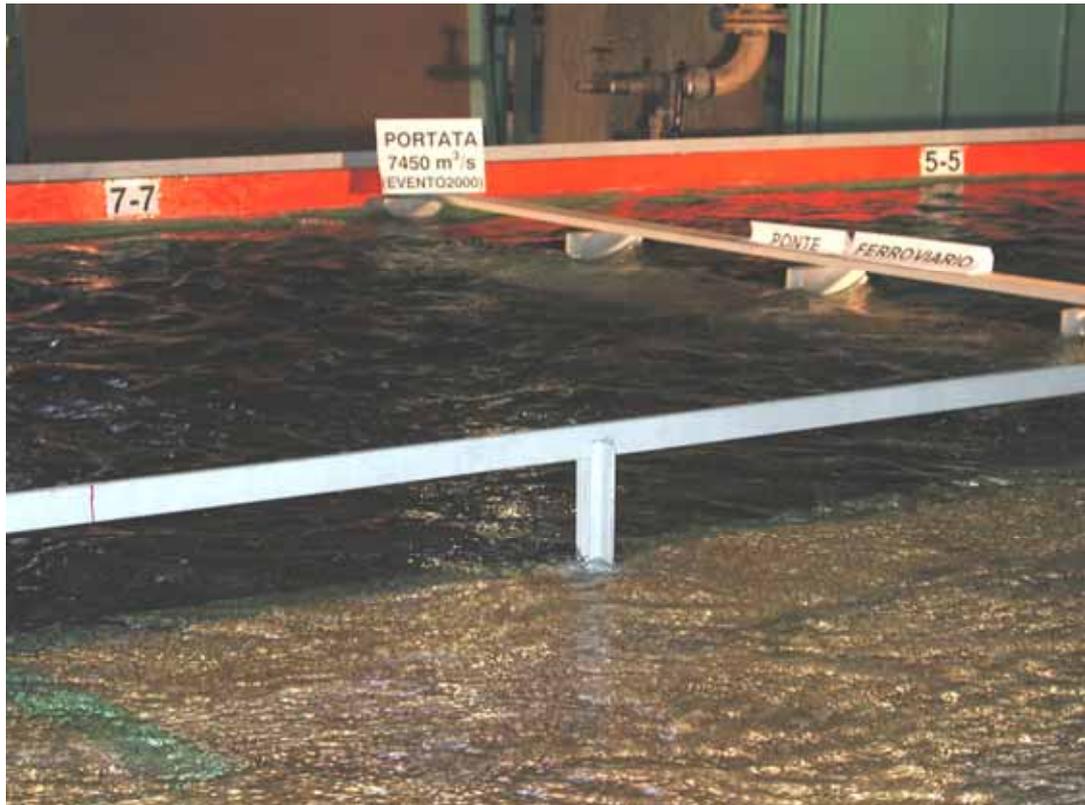


Figura 44: Portata $Q_{2000}=7450\text{m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in destra orografica.

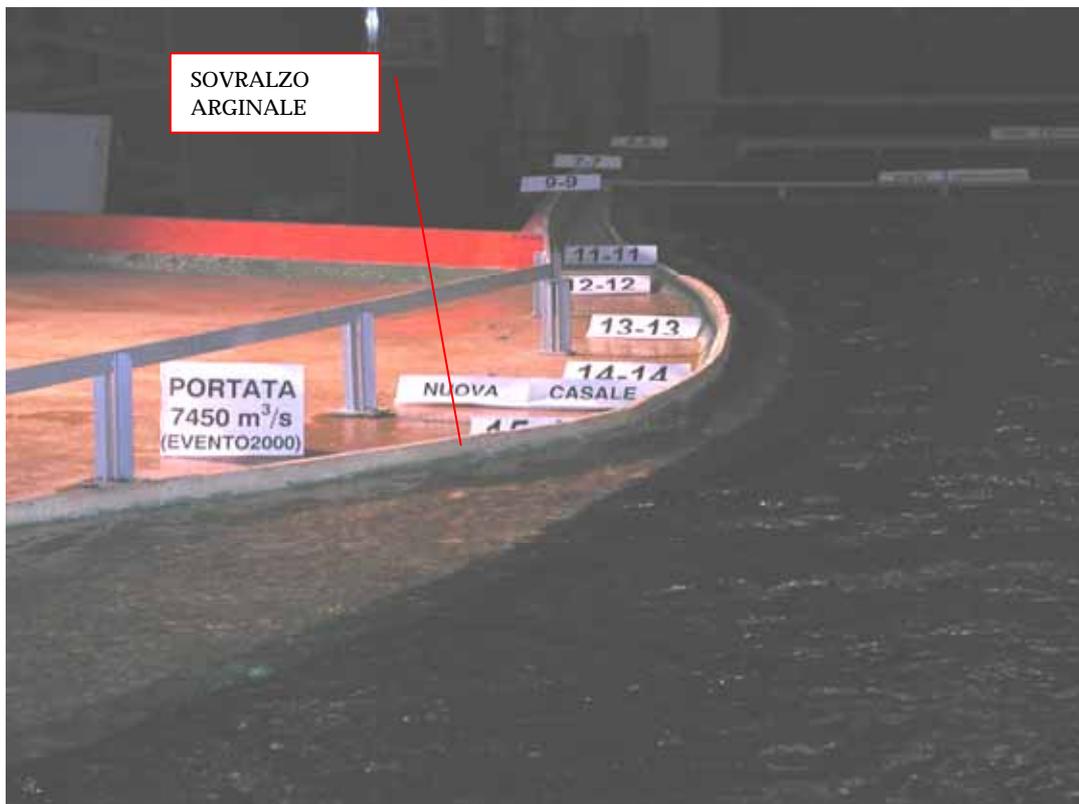


Figura 45: Portata $Q_{2000}=7450\text{ m}^3/\text{s}$ – Sezioni 9 – 15 in destra orografica.



Figura 46: Portata $Q_{2000}=7450\text{m}^3/\text{s}$ – Sezioni 5 – 7 in sinistra orografica.



Figura 47: Portata $Q_{2000}=7450\text{m}^3/\text{s}$ – Sezioni 11 – 15 in sinistra orografica.

2.4.3 $Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} - 7750 \text{ m}^3/\text{s}$

Per quanto riguarda la $Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$ (contenuta nella fascia B) si è osservato un incremento dei livelli tale da provocare un sormonto degli argini già a partire dalla sezione 5 subito a valle del ponte stradale sia in destra che in sinistra orografica. Il deflusso di questa portata causerebbe l'allagamento delle zone poste a monte della zona in cui è stato realizzato sul modello il sovrizzo arginale e quindi lo studio di dettaglio sugli effetti dell'adeguamento arginale è privo di significato.

I livelli idrici conseguenti al deflusso di tale portata, non sono stati pertanto misurati così come non sono state eseguite le misure di velocità, ma è stato realizzato un filmato che rappresenta le condizioni idrodinamiche di deflusso della $Q_{\text{ALLUVIONE } 2000} = 7750 \text{ m}^3/\text{s}$.

3 CONCLUSIONI

Lo studio condotto ha permesso di analizzare in dettaglio l'idrodinamica dei deflussi di piena nel tratto di fiume Po prospiciente la località Nuova Casale situata in destra idrografica a valle del ponte ferroviario.

La taratura del modello è stata eseguita utilizzando il valore della portata defluita in occasione dell'evento alluvionale del 1994 registrata all'idrometro di Casale

In particolare sono stati misurati i livelli idrometrici corrispondenti al deflusso delle portate con tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni indicate nella Direttiva Piene di Progetto del P.A.I. ed i relativi franchi rispetto alle attuali quote degli argini golenale in destra e maestro in sinistra idrografica.

La campagna di prove sperimentali condotta, ha evidenziato che il deflusso delle suddette portate di piena con le attuali quote arginali avviene senza determinare alcun fenomeno di esondazione sia in destra che in sinistra idrografica. Tuttavia si osserva che il deflusso della piena con tempo di ritorno cinquecentennale ($Q_{500}=6900$

m³/s) avviene senza garantire adeguati franchi arginali sia in destra che in sinistra orografica.

Per quanto attiene alle velocità della corrente esse rimangono in generale comprese tra i 2 m/s e i 5 m/s ed in particolare l'innalzamento dell'argine golenale in destra orografica non causa variazioni significative delle stesse.

I rilievi sperimentali sono stati estesi all'analisi delle condizioni di deflusso della piena dell'evento alluvionale dell'ottobre 2000 ricavata ex-post dallo studio di progetto di integrazione al P.A.I. eseguito dalla Società Risorse Idriche per conto dell'Autorità di Bacino del fiume Po ($Q_{\text{ALLUVIONE 2000}} = 7450 \text{ m}^3/\text{s}$ non contenuta nella fascia B).

Le misure evidenziano l'effettiva insufficienza dell'attuale argine golenale destro a contenere il deflusso della suddetta portata di piena, confermando di fatto quanto è avvenuto nel corso del tragico evento alluvionale dell'ottobre 2000.

In conclusione, secondo le risultanze delle misure effettuate sul modello, si può affermare che l'elevazione dell'argine golenale a difesa della località Nuova Casale alle quote dell'argine maestro, anche se del tutto discutibile dal punto di vista idraulico fluviale in quanto un argine golenale deve essere per definizione tracimabile, consentirebbe il deflusso senza esondazioni della citata portata senza determinare effetti di rigurgito a monte ma solamente lievi innalzamenti di livello in corrispondenza dell'argine di Terranova riducendo leggermente i franchi attualmente disponibili.

La nuova geometria degli argini accentuerà leggermente, in sinistra idrografica (argine di Terranova), la situazione di criticità in corrispondenza della sezione 15 peraltro già in essere nella situazione attuale.

Va comunque ricordato che i risultati ottenuti dallo studio su modello fisico sono ampiamente cautelativi (ossia manifestano una situazione peggiore di quella realmente in essere) in quanto la taratura dello stesso è avvenuta imponendo la riproduzione dei livelli idrici relativi alla piena del 1994 sulle sezioni geometriche attuali (le uniche delle quali si disponeva di un adeguato rilievo topografico di

dettaglio). Tali sezioni rispetto a quelle del 1994 sono state ampliate e ricalibrate e pertanto l'imposizione dei livelli di deflusso del 1994 con l'attuale geometria ha necessariamente comportato una sovrastima della scabrezza d'alveo e quindi una sovrastima dei livelli misurati.

Torino, li 30 marzo 2005

Il responsabile della ricerca

prof. ing. Maurizio Rosso