



**AGENZIA INTERREGIONALE PER IL FIUME PO**  
Via Garibaldi 75 - 43100 PARMA

## **UFFICIO DI ALESSANDRIA**

### **OPERE IDRAULICHE DI 2<sup>a</sup> CATEGORIA FIUME PO**

#### **PROGETTO PRELIMINARE**

**LAVORI DI ARRETRAMENTO ARGINE IN SINISTRA OROGRAFICA DEL  
FIUME PO IN LOCALITA' "CASCINA CONSOLATA" DEL COMUNE DI  
CASALE MONFERRATO.**

**ELABORATO:**

**RELAZIONE TECNICA  
IPOTESI A E B**

**ALLEGATO:**

**1**

#### **GRUPPO DI PROGETTAZIONE**

**Progettista**

Ing. Carmelo PAPA

**Collaboratore Progettista**

Geom. Eligio DI MASCIO

**Tecnici Collaboratori**

Ist.Tec. Gianluigi SAVINI

Ist.Tec. Giacomo NEZZO

Ist. Idr. Daniele SANGUIN

**IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO**

Dott. Ing. Carlo CONDORELLI

**DATA:**

.

**PERIZIA N.**

.

**PROT. N.**

.

## INDICE

|   |          |
|---|----------|
| <b>1. PREMESSA .....</b>  | <b>2</b> |
| <b>2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....</b>   | <b>4</b> |
| <b>3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO .....</b>  | <b>5</b> |
| <b>4. SOLUZIONI PROGETTUALI.....</b>  | <b>6</b> |
| <b>5. SOLUZIONE PROGETTUALE “A” .....</b>   | <b>6</b> |
| 5.1. Descrizione degli interventi .....   | 6        |
| 5.2. Disponibilità delle aree .....   | 7        |
| <b>6. SOLUZIONE PROGETTUALE “B”.....</b>  | <b>7</b> |
| 6.1. Descrizione degli interventi .....   | 7        |
| 6.2. Disponibilità delle aree .....   | 8        |
| <b>7. STIMA DEI COSTI DI INTERVENTO.....</b>  | <b>8</b> |
| <b>8. ELENCO ELABORATI .....</b>  | <b>8</b> |
| <i>ALLEGATO: PROPOSTA MIGLIORATIVA PER L'ARRETRAMENTO DELL'ARGINE<br/>SINISTRO DEL FIUME PO IN LOCALITA' CASCINA CONSOLATA A CASALE<br/>MONFERRATO.....</i> |          |
|   | 9        |

## **1. PREMESSA**

A seguito degli eventi alluvionali del 1994 e del 2000 nel tratto casalese del F. Po si sono registrati livelli idrometrici prossimi alla quota della sommità delle arginature maestre, eccezionali portate idrauliche ed estesi fenomeni di allagamento delle aree a compagna del sistema arginale in sponda orografica sinistra, con coinvolgimento delle frazioni Casale Popolo, Oltreponte, Terranova.

E' stata inoltre completamente inondata l'area golenale a valle del ponte della ferrovia, nota come "Nuova Casale".

Nell'immediatezza dell'evento del 2000 l'AIPO ha provveduto alla realizzazione degli interventi urgenti per il ripristino dei tratti arginali danneggiati ed ha attuato una serie di interventi strutturali indispensabili per il consolidamento del sistema arginale con adeguamenti di sagoma, diaframature ed impermeabilizzazioni.

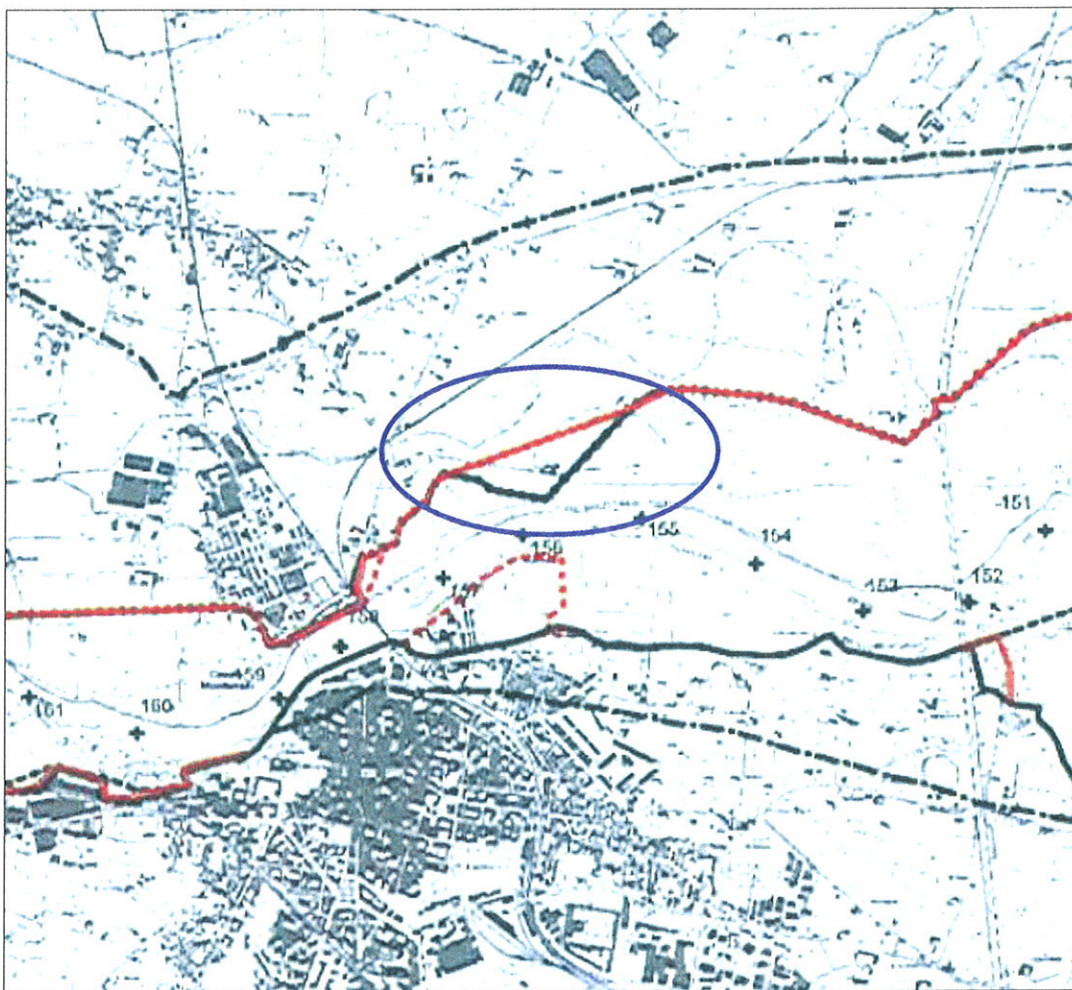
Alcuni interventi per il ripristino delle sezioni di deflusso sono stati delegati con convenzione all'Amm.ne comunale di Casale M.to.

Nel 2005 l'AIPO ha commissionato al Politecnico di Torino lo studio e la realizzazione del modello fisico dell'idrodinamica dei deflussi di piena nel tratto a valle del ponte ferroviario in località "Nuova Casale", che ha consentito la progettazione e la realizzazione nel 2007 dell'intervento di adeguamento del rilevato arginale secondario.

A seguito delle criticità emerse nel corso dell'evento dell'ottobre 2000 l'autorità di Bacino del F. Po ha redatto ed approvato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 10/2008 del 18.3.2008 il "Progetto di variante al PAI per la sistemazione idraulica del F. Po da confluenza Dora Baltea a confluenza Tanaro".

Successivamente, con Deliberazione n. 7/2010 nella seduta del 21/12/2010, il Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po ha adottato la suddetta Variante PAI della quale, nel seguito, se ne riporta uno stralcio planimetrico.





Stralcio planimetrico della variante PAI

Il progetto di variante contiene l'aggiornamento delle fasce fluviali resi necessari in conseguenza del suddetto evento alluvionale e l'individuazione propedeutica degli interventi necessari per la messa in sicurezza del nodo idraulico di Casale M.to con lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del F. Po nel tratto da confluenza Dora Baltea a confluenza Tanaro".

Lo Studio di fattibilità ha verificato in particolare le attuali condizioni di sicurezza idraulica, ha definito il quadro delle criticità residue ed ha individuato gli interventi di seconda fase funzionali al potenziamento delle capacità di laminazione delle piene, oltre che alcuni interventi di completamento della cosiddetta prima fase (argini ed interventi di miglioramento della capacità di deflusso).

Tra questi ultimi, al fine di garantire un livello di sicurezza adeguato per il centro abitato di Casale M.to rispetto ai livelli idrici desunti con il modello fisico commissionato da AIPO al Politecnico di Torino, e' stato individuato l'intervento prioritario di fase 1 di "adeguamento dell'argine e ricollocazione della cascina Consolata a valle del ponte ferroviario di Casale M.to".

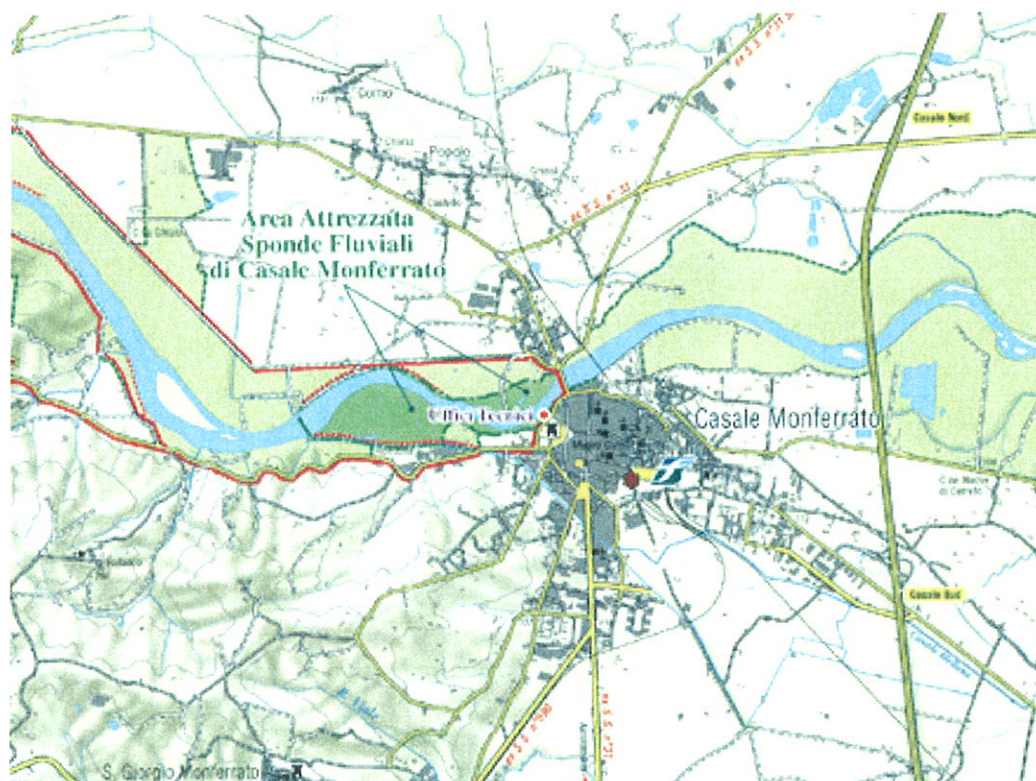


Con l'arretramento verrà eliminata una chiusura anomala della golena da parte dell'argine maestro in sponda sinistra a valle del ponte della ferrovia, dove con il modello fisico commissionato da AIPO al Politecnico di Torino sono stati verificati franchi molto ridotti.

L'intervento di arretramento consentirà una riduzione del colmo di piena rispetto all'evento del 2000 di circa cm 30.

## 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area interessata dagli interventi rientra nella zona di interesse del Parco Fluviale del Po e dell'Orba - tratto Po vercellese-alessandrino. Nel seguito si riporta uno stralcio planimetrico delle aree interessate dal Parco.



L'area golenale tra il ponte ferroviario e la "cuspid" arginale esistente è classificata nel PRGC vigente quale area destinata a servizi di categoria per il gioco/verde/sport (V. Elaborato 4).

### 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO

Lo Studio di fattibilità avviato nel febbraio 2005 è stato sottoposto alla valutazione degli organi tecnici dell'Autorità di Bacino con esito favorevole.

Con Deliberazione 10/2008 del 18/03/2008 il Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po ha adottato il "Progetto di variante al PAI – Sistemazione idraulica del F. Po da confluenza Dora Baltea a confluenza Tanaro".

L'obiettivo dell'intervento previsto è di eliminare il restringimento della sezione del fiume indotto dalla chiusura anomala della golena da parte dell'argine esistente.

L'argine principale sinistro a valle del ponte ferroviario di casale Monferrato, per proteggere la cascina Consolata, chiude la golena causando un significativo restringimento della sezione del fiume.

Tale restringimento provoca un rigurgito dei livelli a monte che può essere evitato arretrando l'argine nella posizione indicata; questo intervento comporterebbe la delocalizzazione della Cascina.

L'analisi geomorfologica dello Studio di fattibilità mette in evidenza la presenza di paleo-alvei in sponda destra datati 1882. Dall'osservazione della cartografia tecnica recente e dalle fotografie aeree (Volo di Magra 2002) risulta come la zona sia caratterizzata da un numero elevato di paleo-alvei a testimonianza della naturale tendenza a divagare del Fiume Po. Questo indica che il settore in oggetto è caratterizzato da una continua evoluzione geomorfologica i cui cambiamenti sono indotti anche dall'azione antropica: la realizzazione di sistemi arginali limitano la migrazione laterale del corso d'acqua e gli interventi di canalizzazione a scopo agricolo obliterano i caratteri morfologici originari.

La caratterizzazione sismica del suolo verrà eseguita in accordo con quanto stabilito dal D.M. 17/01/2008 "Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni" e sarà volta alla definizione del modello geofisico del volume di terreno indagato al fine di stimare la risposta sismica locale, secondo la relativa situazione litostratigrafica.

La caratterizzazione geotecnica del terreno di fondazione sarà effettuata a seguito della campagna di indagine caratterizzata dalle seguenti prove da eseguirsi in situ e/o in laboratorio:

Le indagini si articolano sulle seguenti attività:

- Esecuzione indagini geofisiche –metodo di analisi spettrale delle onde di superficie noto come tecnica MASW.
- Esecuzione di sondaggi meccanici con installati piezometri Casagrande
- Esecuzione di prove geotecniche in sito
- Esecuzione di prove geotecniche di laboratorio

## 4. SOLUZIONI PROGETTUALI

Le soluzioni progettuali prese in considerazione fanno riferimento all'ipotesi già prevista dall'Autorità di Bacino nel Fiume Po e dal PAI, Piano per l'Assetto Idrogeologico (ipotesi che nel seguito identificheremo con la lettera "A"), e l'ipotesi alternativa proposta dal proprietario dell'Azienda Agricola "Bosco della C.na" titolare della proprietà della C.na Consolata e delle aree circostanti (ipotesi che nel seguito identificheremo con la lettera "B").

Con riferimento ai livelli idrometrici dell'evento "ottobre 2000", entrambe le soluzioni hanno lo scopo di ridurre i livelli di piena di circa 30-40 cm nell'abitato di Casale M.to.

## 5. SOLUZIONE PROGETTUALE "A"

### 5.1. *Descrizione degli interventi*

L'ipotesi "A", già prevista dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, prende in considerazione la modifica della linea arginale dall'attuale posizione (nel suo tratto più prossimo al corso d'acqua) ad un tracciato che si mantiene a circa 250 m dall'attuale linea di sponda eliminando, in tal modo, il restringimento esistente (V. Elaborato 5.A.1).

Tale ipotesi prevede la dismissione e la rimozione dell'attuale tracciato per uno sviluppo di circa 1000 m e la realizzazione di una nuova linea arginale nella posizione indicata negli elaborati grafici allegati.

Il nuovo argine avrà una lunghezza di circa 850 m e le medesime caratteristiche geometriche dell'argine esistente. Le quote di sommità saranno tali da raccordare da monte a valle le quote attuali nelle sezioni di attacco all'arginatura esistente a monte e a valle. La sezione sarà di tipo trapezio con larghezza in sommità pari a 6 m e un'altezza (variabile) di circa 4,50 m.

Lungo la scarpata a fiume, il rilevato arginale sarà rivestito con una lastra di cls armato con rete elettrosaldata fondato su un taglione di immorsamento anch'esso in c.a.; un geocomposito tridimensionale rinforzato da rete metallica, garantirà la tenuta e la stabilità dello strato di terreno vegetale necessario alla mascheratura delle lastre di c.a. e al successivo inverdimento.

Sia a fiume sia a campagna, infatti, il rilevato arginale sarà rivestito con uno strato di terreno vegetale, prelevato dallo scortico del coltivo, e messo in opera dopo essere stato opportunamente controllato in cantiere.

Tale soluzione consente di aumentare i franchi idraulici in Casale M.to di circa 30 cm rispetto agli esigui valori attuali riducendo corrispondentemente i livelli di piena.



## 5.2. *Disponibilità delle aree*

Per quanto riguarda la soluzione "A", le aree interessate dagli interventi sono tutte di proprietà privata (V. Elaborato 5.A.3).

Si rende necessario, quindi, acquisirle mediante l'istituto dell'esproprio previa apposizione del vincolo preordinato.

Nella stima del valore degli espropri e degli indennizzi, oltre al valore delle superfici direttamente espropriate, si è tenuto conto della perdita di valore di quelle aree attualmente presidiate dall'argine esistente e che, nella configurazione di progetto, potrebbero invece essere interessate da allagamenti con un tempo di ritorno pari a quello che interesserebbe le aree golenali.

## 6. SOLUZIONE PROGETTUALE "B"

### 6.1. *Descrizione degli interventi*

La soluzione alternativa proposta dal proprietario dell'Azienda Agricola "Bosco della Cascina" prevede, invece, di abbassare l'attuale piano golenale nella fascia immediatamente adiacente al corso d'acqua per una larghezza compresa tra circa 40 e 90 m, per una profondità dall'attuale piano campagna pari a circa 4-5 m e per uno sviluppo complessivo di circa 1300 m (V. Elaborato 6.B.1).

Ciò consentirebbe, secondo l'analisi idraulica condotta dai consulenti del Proponente (riportata in allegato al presente Elaborato) di raggiungere il medesimo beneficio idraulico che si prefigge il PAI aumentando la capacità di portata del corso d'acqua e di arretrare l'argine in modo meno invasivo rispetto all'Ipotesi "A".

In pratica tale seconda ipotesi consente di ridurre i livelli di piena di circa 40 cm nell'abitato di Casale M.to.

In tal caso le modifiche da apportare al tracciato arginale sarebbero più modeste di quelle richieste dalla soluzione "A"; mantenendo, infatti, inalterata la sezione tipologica della sagoma arginale, la nuova linea arginale avrebbe una lunghezza di circa 450 m in quanto verrebbe ad essere modificato esclusivamente il tracciato nel punto più prossimo al corso d'acqua.

Con tale ipotesi l'attuale tracciato sarebbe interessato dalla dismissione e dalla rimozione per uno sviluppo di circa 500 m.

In tale ipotesi la C.na Consolata rimarrebbe salvaguardata e presidiata dal nuovo argine.

## **6.2.      *Disponibilità delle aree***

Per quanto riguarda l'ipotesi "B" le aree interessate dagli interventi ricadono in parte su terreni demaniali (in particolare per una parte della fascia soggetta all'abbassamento del piano golenale); per il resto anche per tale soluzione progettuale sarà necessario ricorrere all'istituto dell'esproprio (V. Elaborato 6.B.3).

Questa ipotesi di progetto, pur prevedendo un'area interessata direttamente dagli interventi con dimensioni maggiori che non l'ipotesi "A", è caratterizzata da minori oneri di esproprio e/o di indennizzo in quanto una buona parte è costituita da aree demaniali.

## **7. STIMA DEI COSTI DI INTERVENTO**

Per la stima dei costi di intervento è stato impiegato il Prezziario Regionale Ed. 2011 e, per le voci non ricompresse, il Prezziario AIPO.

Ciò ha consentito di stimare i costi per entrambe le ipotesi; essi sono riportati nei rispettivi elaborati di Stima (Elaborati 5.A.4 e 6.B.4) e di Quadro Economico (Elaborati 5.A.5 e 6.B.5) ai quali si rimanda per i dettagli.

## **8. ELENCO ELABORATI**

Nel seguito si elencano gli elaborati costituenti il presente Progetto:

- 1 – RELAZIONE TECNICA (IPOTESI "A" E "B")
- 2 – DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA
- 3 – COROGRAFIA (1:25000)
- 4 – ESTRATTO P.R.G.C.
- 5.A.1 - IPOTESI "A" - PLANIMETRIA DI PROGETTO
- 5.A.2 - IPOTESI "A" - SEZIONE TIPO
- 5.A.3 – IPOTESI "A" - PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO ED ELENCO DITTE
- 5.A.4 - IPOTESI "A" - STIMA SOMMARIA DEI COSTI DI INTERVENTO
- 5.A.5 - IPOTESI "A" - QUADRO ECONOMICO.
- 6.B.1 - IPOTESI "B" - PLANIMETRIA DI PROGETTO
- 6.B.2 - IPOTESI "B" - SEZIONE TIPO
- 6.B.3 – IPOTESI "B" - PIANO PARTICELLARE DI ESPROPRIO ED ELENCO DITTE
- 6.B.4 - IPOTESI "B" - STIMA SOMMARIA DEI COSTI DI INTERVENTO
- 6.B.5 - IPOTESI "B" - QUADRO ECONOMICO.

**ALLEGATO: PROPOSTA MIGLIORATIVA PER L'ARRETRAMENTO DELL'ARGINE  
SINISTRO DEL FIUME PO IN LOCALITA' CASCINA CONSOLATA A CASALE  
MONFERRATO**





Azienda Agricola


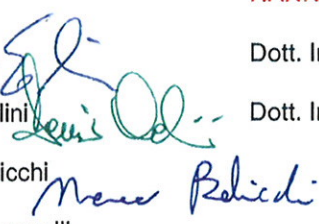
**Bosco della Cascina**

di Balbo Giuseppe

Strada Grossa n° 10 Frassineto Po (AL)

## PROPOSTA MIGLIORATIVA PER L'ARRETRAMENTO DELL'ARGINE SINISTRO DEL FIUME PO IN LOCALITA' CASCINA CONSOLATA A CASALE MONFERRATO

### STUDIO IDRAULICO

| 00   | DIC-10 | Prima emissione | RV   | DC     | UM      |
|--|--------|-----------------|--|--------|---------|
| INDICE   | DATA   | MODIFICHE       | DISEGN.  | CONTR. | APPROV. |
| <h2>RELAZIONE</h2>   |        |                 |  |        |         |
| <p><b>I CONSULENTI:</b></p> <p> <b>Prof. Ugo Majone</b><br/>Dott. Ing. Denis Cerlini<br/>Dott. Ing. Marco Belicchi<br/>Dott. Ing. Nicola Pessarelli</p> |        |                 | <p><b>HANNO COLLABORATO:</b></p> <p>Dott. Ing. Michele Ferrari<br/>Dott. Ing. Renato Vacondio</p> <p></p> |        |         |
| <p><b>MAJONE &amp; PARTNERS ENGINEERING</b></p> <p>Via Inama, 7 - 20133 Milano - tel. +39.02.70120918 fax +39.02.70120923<br/>Via Cavallotti, 16 - 43121 Parma - tel. +39.0521.508419 fax +39.0521.221022</p>                              |        |                 | <p>Dicembre 2010</p>   |        |         |

## INDICE

---

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1.  | PREMESSA.....  | 2  |
| 2.  | STUDIO DI FATTIBILITÀ AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO..... | 3  |
| 3.  | BATIMETRIA.....  | 5  |
| 4.  | MESH DI CALCOLO .....                                      | 6  |
| 5.  | CONDIZIONI AL CONTORNO E SCABREZZE .....                   | 8  |
| 6.  | DESCRIZIONE DELL'ASSETTO DI PROGETTO MIGLIORATIVO .....    | 10 |
| 7.  | RISULTATI DELLA MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE.....           | 15 |
| ALLEGATO A – CARTOGRAFIE RELATIVE ALLA SIMULAZIONE DI STATO DI FATTO            |  |    |
| ALLEGATO B – CARTOGRAFIE RELATIVE ALLA SIMULAZIONE DELL'ASSETTO<br>MIGLIORATIVO |  |    |
| ALLEGATO C – DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO                                 |  |    |

## 1. PREMESSA

L'azienda agricola Bosco della Cascina ha incaricato la scrivente società di ingegneria Majone & Partners di effettuare uno studio idraulico volto all'ottimizzazione dell'intervento di arretramento dell'argine sinistro del fiume Po, a valle dell'abitato di Casale M.to in località cascina Consolata.

Esso è stato inserito nel programma degli interventi a seguito dello *"Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Po nel tratto dalla confluenza del fiume Dora Baltea alla confluenza del fiume Tanaro"* redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po nel 2007, ed attualmente A.I.Po ha dato inizio alla campagna di indagini propedeutica alle attività di progettazione.

Così come richiesto dai tecnici A.I.Po con lettera prot. n° 43792 dell'11/11/2010, gli scriventi hanno redatto la presente relazione in cui sono sintetizzati i risultati dello studio idraulico. In particolare verranno di seguito illustrati:

- un breve riassunto dello studio di fattibilità redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po;
- una proposta di soluzione progettuale migliorativa che, oltre a migliorare l'obiettivo idraulico, riduca gli oneri derivanti dalla delocalizzazione dell'azienda agricola cascina Consolata e consenta di ottenere una riqualificazione ambientale del tratto di sponda sinistra del fiume Po poco a valle di Casale M.to;
- le modalità realizzative ed i risultati delle verifiche idrauliche condotte mediante modellazione bidimensionale della soluzione progettuale migliorativa proposta.



## 2. STUDIO DI FATTIBILITÀ AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO

Nel Giugno 2007 l'Autorità di Bacino del fiume Po ha redatto lo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Po nel tratto dalla confluenza del fiume Dora Baltea alla confluenza del fiume Tanaro", avente le finalità di seguito richiamate:

- ottenere una valutazione complessiva ed intersettoriale delle attuali condizioni di sicurezza idraulica e di assetto morfologico ed ambientale della regione fluviale potenzialmente interessata dal deflusso delle piene del Po, nel tratto di interesse;
- verificare l'efficienza e la funzionalità delle opere idrauliche presenti, soprattutto in considerazione delle significative modificazioni dei sistemi difensivi intervenute a seguito dei numerosi interventi realizzati dopo le piene del 1994 e del 2000;
- definire l'assetto geomorfologico attuale del corso d'acqua come prodotto di processi fluviali storici censiti e cartografati, per prevedere le potenziali tendenze evolutive nel medio e lungo periodo;
- valutare la necessità e l'opportunità di procedere con ulteriori opere di adeguamento dei sistemi difensivi esistenti: (aree golenali, opere di difesa lineare, aree di laminazione ecc.) che concorrono a determinare le modalità di propagazione e deflusso delle onde di piena, al fine di abbattere il rischio idrogeologico al livello definito dal PAI per il tratto fluviale in esame;
- individuare ulteriori possibilità di incrementare l'efficienza della regione fluviale in termini di capacità di limitare le portate al colmo ed i volumi di piena trasferiti verso valle, al fine di rispettare le "portate obiettivo" definite in precedenza dalla medesima Autorità di Bacino a scala di asta fluviale;
- definire il quadro degli interventi necessari al raggiungimento degli obiettivi della pianificazione;
- sviluppare, a livello di fattibilità, la progettazione di detti interventi.

Fra i diversi interventi sviluppati a livello di fattibilità nel sopra citato studio vi è quello relativo all'arretramento dell'arginatura posta in sinistra idraulica, immediatamente a valle dell'abitato di Casale Monferrato (Cascina Consolata).



Nella relazione relativa all'analisi di fattibilità dei diversi interventi del citato studio è evidenziato come l'arginatura in sinistra a valle del fiume Po formi un significativo restringimento della sezione del fiume causando un rigurgito dei livelli a monte. La soluzione progettuale riportata nello studio di fattibilità (vedi anche Figura 1) prevede la rimozione di 1200 m di arginatura, al fine di rendere significativa la quantità di deflusso che avviene nella zona golenale.

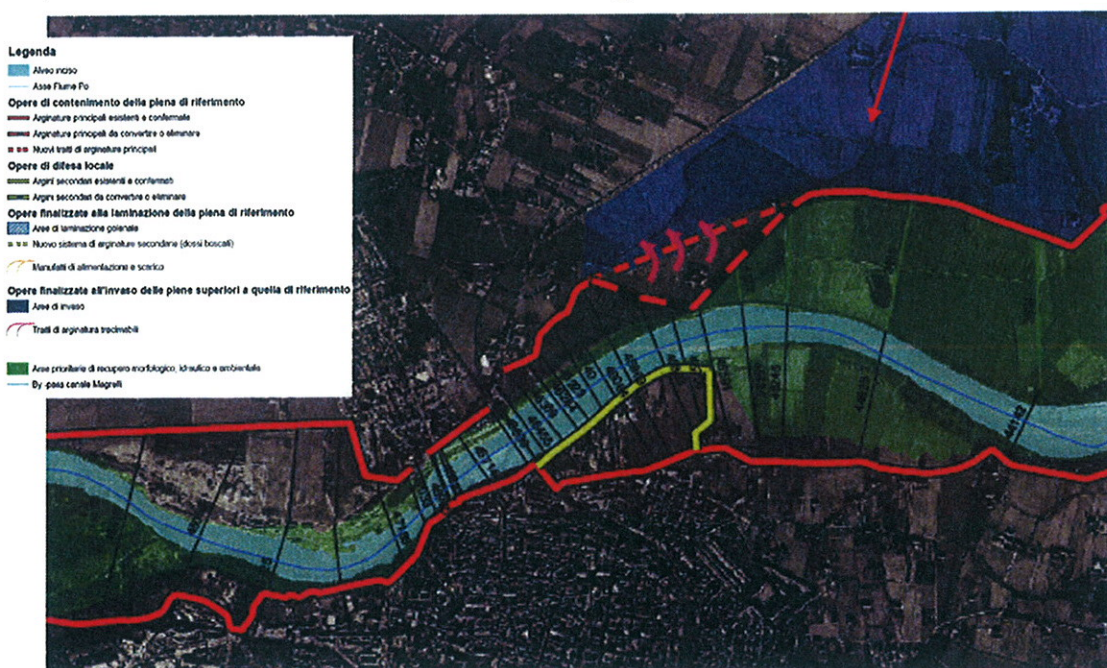


Figura 1 - Riconfigurazione dell'argine in corrispondenza della Cascina Consolata: linea rosso – nera argine esistente da dimettere, linea rossa tratteggiata nuova arginatura da realizzare.

Nel medesimo studio di fattibilità sono state verificate le variazioni in termini di livello indotte da questo intervento, quantificando in circa 30 cm l'abbassamento ottenibile nel tratto di fiume Po a monte della cascina (con riferimento all'evento di piena dell'Ottobre 2000). Resta inteso che, al fine dell'ottenimento del beneficio indicato nello studio, anche se non esplicitamente ivi indicato l'intervento presuppone:

- la completa delocalizzazione della cascina Consolata e la riprofilatura complessiva delle quote della golenale;
- la rimozione di tutti i rilevati stradali oggi presenti per garantire la viabilità all'interno della azienda agricola nonché l'accesso alla cascina stessa.

### 3. BATIMETRIA

La batimetria dell'area di studio è stata costruita seguendo la metodologia già utilizzata nel già citato studio di fattibilità *"Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Po nel tratto dalla confluenza del fiume Dora Baltea alla confluenza del fiume Tanaro"* dell'Autorità di Bacino del fiume Po.

Per caratterizzare l'intero dominio in esame (ad eccezione dell'alveo inciso) si è fatto riferimento al Digital Terrain Model (DTM) generato sulla base di un rilievo aereofotogrammetrico con tecnologia laser-scan, eseguito nel 2004 dalla Compagnia Generale Riprese aeree S.p.A. Tale rilievo consente la descrizione di dettaglio della topografia ad eccezione della porzione di regione fluviale in cui è presente acqua. Le discontinuità del terreno come i rilevati arginali o stradali, le scarpate di sponda ecc. sono descritte mediante breaklines. Al fine di realizzare una batimetria completa dell'intero dominio il rilievo laser-scanner è stato integrato, per la sola parte di alveo inciso, con le sezioni trasversali rilevate nell'anno 2004 dalla società Geovit S.a.s. per conto dell'Agenzia Interregionale per il Fiume Po.

Il modello digitale del terreno (Digital Elevation Model - DEM) è stato realizzato con il software SMS (sviluppato dalla Brigham Young University e commercializzato da Aquaveo) utilizzando la funzione Scatter Data che realizza un DTM formato da triangoli irregolari che consentono di descrivere tutte le discontinuità del terreno quali arginature, sponde, strade, ecc., svincolandone la precisione dalla dimensione del passo di griglia. Le batimetrie sono riportate negli allegati grafici alla presente relazione.



#### 4. MESH DI CALCOLO

Il dominio di interesse in cui è stato realizzato il modello bidimensionale è il tratto di fiume Po compreso fra la traversa Lanza (a monte dell'abitato di Casale M.to) ed il ponte autostradale Gravellona – Toce (A26) per un'estensione misurata lungo l'asse del fiume Po pari a circa 6.2 km. Nonostante la porzione di fiume Po da analizzare nel presente studio risulti più ridotta, si è ritenuto di estendere il dominio in modo da eliminare gli effetti delle condizioni al contorno nella zona di interesse. Per facilitare l'imposizione delle condizioni al contorno il dominio è stato chiuso sia verso monte che verso valle in corrispondenza di due strutture.

La mesh di calcolo è stata realizzata utilizzando elementi triangolari irregolari ed utilizzando il meshatore integrato in SMS: elementi di dimensioni più ridotte sono stati utilizzati nella zona compresa fra il ponte stradale di Casale M.to e la cascina Consolata, mentre il resto del dominio è stato discretizzato con elementi di dimensioni maggiori per limitare i tempi di calcolo necessari per realizzare le simulazioni. Utilizzando una mesh non strutturata è inoltre possibile descrivere in maniera adeguata le discontinuità che caratterizzano il territorio quali i rilevati arginali e stradali, le scarpate, le strade, le rampe, ecc...

La mesh utilizzata per lo stato di fatto è formata da 35'926 elementi, su una superficie complessiva di 4.075 km<sup>2</sup>. Mentre la mesh relativa all'assetto di progetto è costituita da 37'920 elementi su una superficie all'incirca analoga. In entrambi i casi gli elementi della mesh utilizzati nella zona di interesse all'interno dell'alveo hanno una superficie di circa 10 m<sup>2</sup>. In Figura 2 è riportato un dettaglio della mesh di calcolo utilizzata relativamente alla configurazione di assetto di progetto. Le quote del terreno sono poi state assegnate alle celle di calcolo interpolandole sulla base della batimetria precedentemente elaborata.

Nel citato studio di fattibilità dell'Autorità di bacino del Po, il modello bidimensionale riguarda una superficie complessiva di circa 75 km<sup>2</sup> discretizzata con 5794 elementi, e la dimensione degli elementi della mesh all'interno del fiume è di circa 100 m<sup>2</sup>; tale modello bidimensionale è stato implementato con uno scopo essenzialmente pianificatorio e dovendo analizzare un dominio con una superficie complessiva quasi 20 volte maggiore, ed è stato quindi realizzato utilizzando elementi



significativamente più grandi rispetto a quelli utilizzati nel presente studio. In definitiva il modello bidimensionale utilizzato nel presente studio è in grado di fornire un livello di dettaglio molto superiore nell'area in esame.

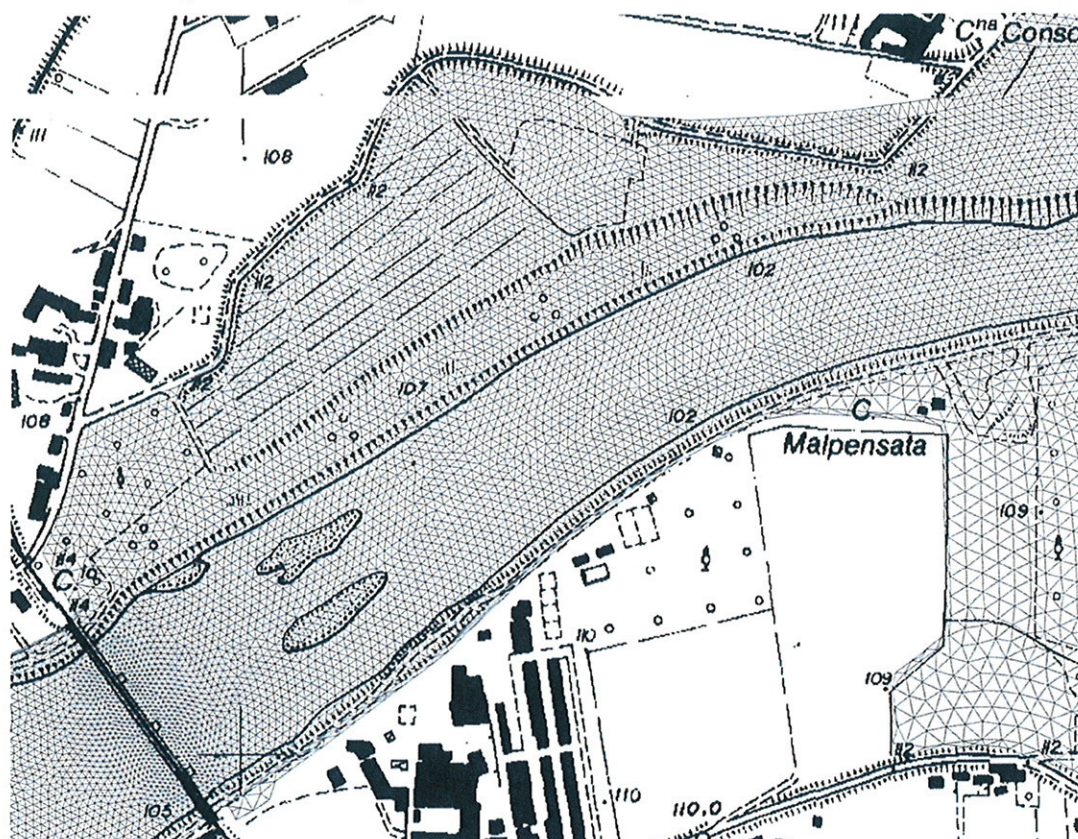


Figura 2 – Dettaglio della mesh di calcolo nella zona di interesse; configurazione relativa all'assetto di progetto



## 5. CONDIZIONI AL CONTORNO E SCABREZZE

Nella sezione di monte posta in corrispondenza della traversa Lanza è stata imposta, come condizione al contorno di monte, un valore di portata di  $7862 \text{ m}^3/\text{s}$  che risulta essere il massimo valore di portata della piena del 2000, così come è individuato dallo "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del Fiume Po nel tratto dalla confluenza del fiume Dora Baltea alla confluenza del fiume Tanaro" dell'Autorità di Bacino del fiume Po. La simulazione è poi stata arrestata una volta instauratasi una condizione di deflusso di tipo permanente.

A valle il modello è stato chiuso in corrispondenza del ponte dell'Autostrada Garavellona – Toce (A26) utilizzando una condizione al contorno di tipo misto: in corrispondenza dell'alveo inciso è stata imposta la scala di deflusso derivata dal modello monodimensionale implementato nell'ambito del citato studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino del fiume Po, mentre nell'ampia zona golenale posta in sinistra idraulica e compresa fra la fine dell'alveo inciso e l'arginatura maestra del fiume è stata imposta una condizione di tipo "far field". Questo tipo di descrizione consente di evitare che la condizione al contorno causi disturbi all'interno del campo di moto, ed è giustificata dal fatto che nella zona golenale i tiranti idraulici sono comunque modesti in confronto con quelli presenti nell'alveo inciso.

L'imposizione delle condizioni al contorno risulta essere sempre un tema piuttosto delicato nell'implementazione di modelli bidimensionali poiché, se queste si trovano troppo a ridosso della zona di interesse, possono influenzare in maniera significativa le condizioni idrodinamiche della corrente. Per questo motivo nel presente studio le condizioni al contorno sono state imposte in sezioni piuttosto lontane dalla zona di interesse in modo da evitare che tali condizioni influenzino le condizioni di deflusso nel tratto di fiume di interesse compreso fra la casina Consolata e il ponte stradale dell'abitato di Casale M.to. Si è poi verificato che, variando le caratteristiche delle condizioni al contorno, (ed in particolare di quella di valle), le caratteristiche idrodinamiche della corrente nella zona di interesse del presente studio non risultano modificate in maniera significativa.

Per quanto attiene al coefficiente di scabrezza, è stato adottato un coefficiente di Manning pari a  $0.0286 \text{ sm}^{-1/3}$  per l'alveo inciso ed uno pari a  $0.05 \text{ sm}^{-1/3}$  per le zo-

ne golenali. Tali valori sono stati tarati in modo da ottenere un profilo di piena che fosse in accordo con quello relativo alle modellazioni del citato studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino del fiume Po. Si precisa inoltre che tali valori di scabrezza risultano in accordo con quanto riportato nella "Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains" pubblicata da "United States Geological Survey".



## 6. DESCRIZIONE DELL'ASSETTO DI PROGETTO MIGLIORATIVO

L'assetto di progetto migliorativo proposto in questa sede ed oggetto delle verifiche idrauliche è costituito dall'arretramento di una porzione di argine più modesta rispetto a quanto previsto dall'Autorità di Bacino del fiume Po e, contestualmente, dalla regolarizzazione della sezione fluviale nella zona di cascina Consolata.

Osservando lo stralcio planimetrico riportato in Figura 3, è possibile rilevare come la larghezza della sezione dell'alveo inciso in corrispondenza della cascina risulti significativamente ridotta rispetto a quella presente immediatamente a valle dell'attraversamento Ferroviario. La sponda sinistra dell'alveo in tale tratto è realizzata e protetta da un rivestimento in blocchi di calcestruzzo (vedi Figura 4), e da alcuni repellenti che ormai sono praticamente distrutti.

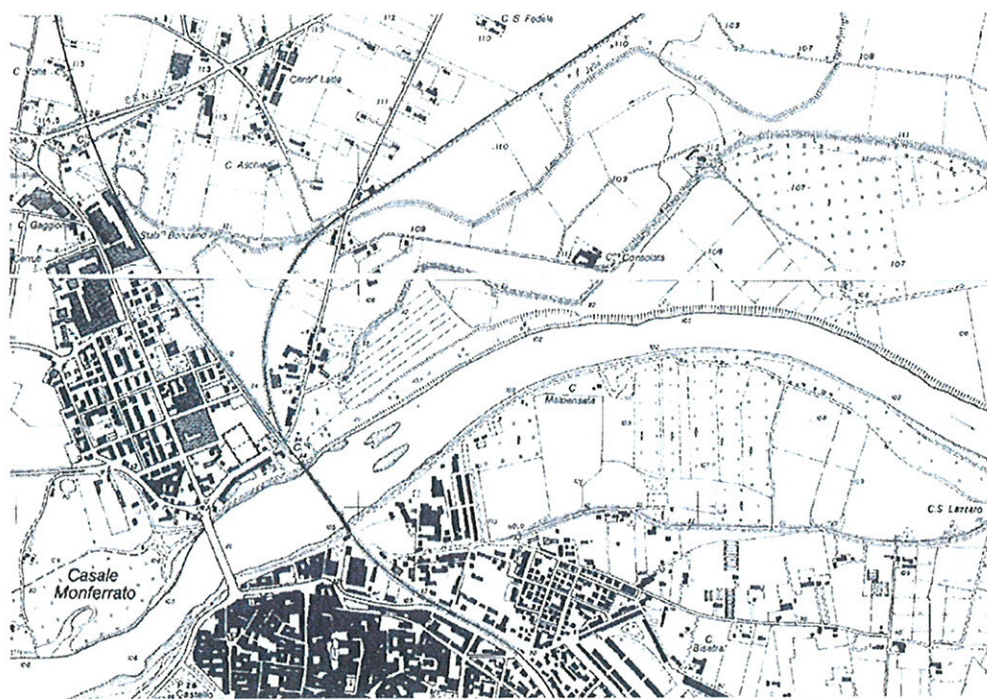
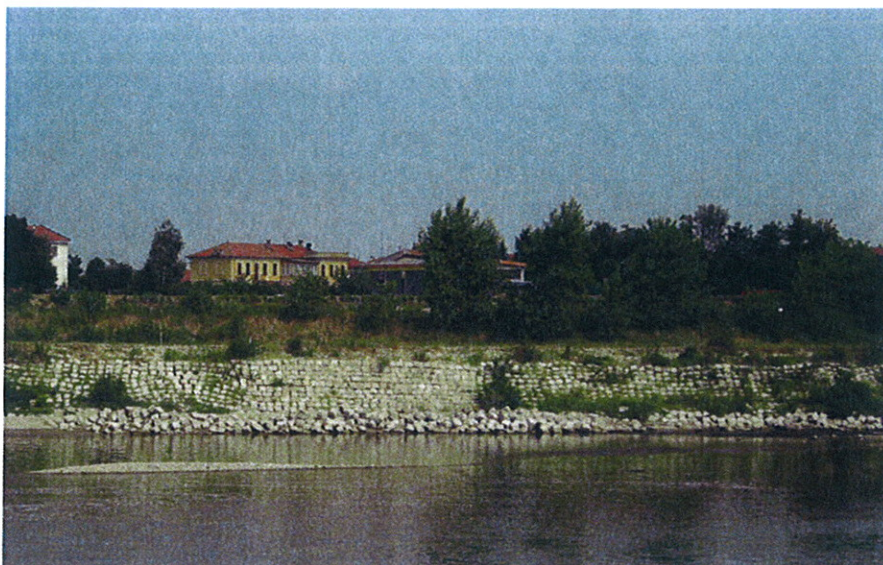


Figura 3 – stralcio planimetrico del tratto di fiume Po di interesse





*Figura 4 – sponda sinistra del fiume Po nel tratto compreso il ponte ferroviario e la cascina Consolata (stato di fatto).*

In proposito occorre osservare che in sinistra idraulica, nella zona immediatamente a monte, compresa fra il ponte stradale quello ferroviario, lavori recentemente terminati hanno consentito di realizzare una sistemazione di sponda costituita da una scogliera in massi naturali opportunamente rinverdita e sovrastante pista di servizio ciclabile con muro di contenimento sempre in blocchi di pietrame a vista. Questo intervento ha consentito di riqualificare la sponda sia dal punto di vista della sua stabilità che da quello paesaggistico - ambientale. In Figura 5 è rappresentato lo stato attuale della sponda.

Nel presente proposta migliorativa si prevede di realizzare una regolarizzazione della sponda sinistra con tipologia di intervento omogenea con quanto già realizzato nella zona fra i due ponti. In particolare sarà rimossa la scogliera in prismi di calcestruzzo limitatamente alla parte fuori acqua (rispetto ai livelli idrici di magra), e questa sarà poi sostituita da un sistema di massi ciclopici opportunamente rinverditi così come già realizzato nella sistemazione di monte. Inoltre sarà prevista la riprofilatura della golena che consentirà di ampliare la bancata intermedia oggi già presente. In questo modo sarà possibile coniugare le esigenze di natura idraulica con quelle di riqualificazione paesaggistico-ambientale, creando eventualmente un percorso ciclopedonale in fregio al fiume, che potrà collegarsi con quello già esistente a monte.





*Figura 5 – sponda sinistra del fiume Po nel tratto compreso fra il ponte stradale e quello ferroviario dopo i lavori di sistemazione.*

Fatti salvi gli obiettivi di natura idraulica dello studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino, l'assetto finale della riprofilatura spondale dovrà comunque essere definito in accordo con gli enti interessati quali Comune di casale M.to, Parco fluviale del Po e dell'Orba, AIPo, Autorità di Bacino del fiume Po, ecc... In tal senso nella Figura 6 è presentata una ipotesi di sistemazione finale della suddetta sponda.

Un secondo elemento caratterizzante la presente proposta migliorativa riguarda l'arretramento dell'arginatura esistente: mentre nello studio di fattibilità l'arretramento riguardava la porzione di argine lunga complessivamente 1200 m, con conseguente necessità di delocalizzare la cascina Consolata, nella presente proposta migliorativa l'arretramento dell'arginatura riguarda soltanto la parte in cui questa si presenta in frodo al Po, per una lunghezza complessiva di circa 350 m (vedi Figura 7). In questo modo sarà così possibile ridurre gli oneri dell'intervento per la realizzazione del nuovo argine e per la delocalizzazione della cascina Consolata.

Nel già citato studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino è prevista la realizzazione di una porzione della nuova arginatura tracimabile, che funziona come opera di presa per l'area di invaso per piene al limite della prevedibilità (zona denominata fascia C1). Tale possibilità resta impregiudicata anche nella nuova configurazione prevista dalla presente proposta migliorativa.

## SEZIONE TIPO

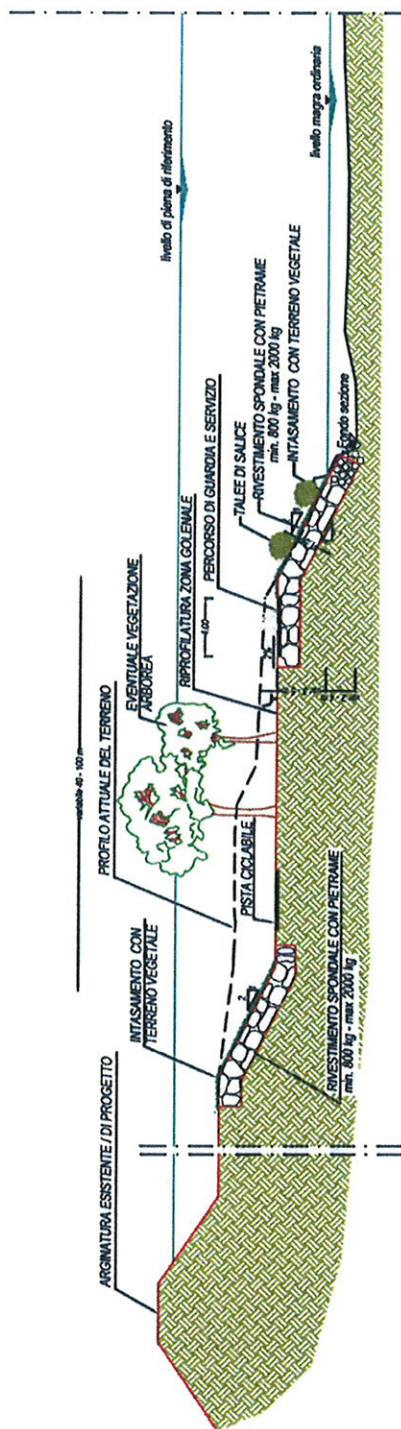


Figura 6 – Sezione tipo della proposta migliorativa di intervento sulla sponda sinistra del fiume Po



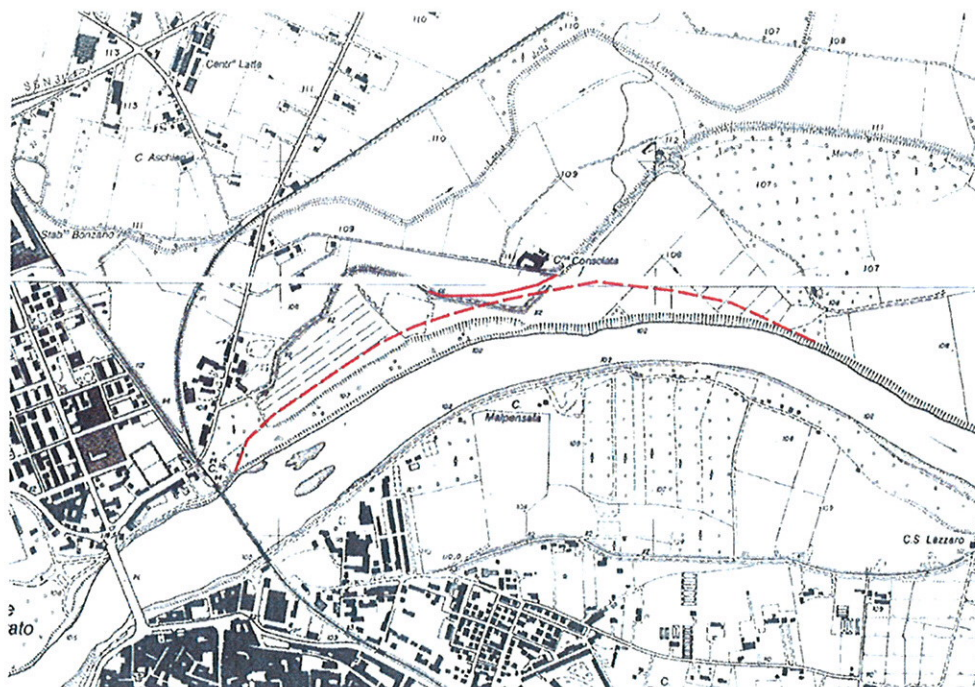


Figura 7 – Stralcio planimetrico con tratto di nuovo argine previsto nella presente proposta migliorativa (linea continua) e linea di svasso della golena esistente (linea tratteggiata).

## 7. RISULTATI DELLA MODELLAZIONE BIDIMENSIONALE

Si rimanda all'Allegato C per una descrizione completa ed analitica del modello di calcolo utilizzato. In questa sede si riportano invece i risultati ottenuti nella simulazione delle due differenti configurazioni:

1 – stato di fatto;

2 – assetto di progetto previsto nella presente proposta migliorativa.

Entrambe le configurazioni sono state simulate in moto permanente, imponendo come condizione al contorno di monte la massima portata relativa all'evento di piena dell'Ottobre 2000 in corrispondenza della traversa Lanza, così come è stimata nel già citato studio di fattibilità dell'Autorità di Bacino del fiume Po.

Si precisa che la stessa Autorità di Bacino del fiume Po prescrive di utilizzare detto evento di piena come piena di riferimento per la progettazione delle opere idrauliche poiché questa risulta essere superiore al valore di colmo della piena duecentennale, così come riportata nel PAI.

Nell'Allegato A sono riportate la batimetria, la mappa dei livelli idrici e quella dei valori assoluti di velocità relativi alla simulazione di stato di fatto. Nell'Allegato B i medesimi elaborati grafici sono riportati anche per la soluzione migliorativa proposta.

Confrontando i risultati delle due simulazioni si osserva che, nella soluzione migliorativa proposta, è eliminato il restringimento della sezione fluviale in prossimità della cascina Consolata. In questo modo è incrementata la capacità di deflusso dell'alveo inciso. Ciò ha consentito di soddisfare ed incrementare l'obiettivo idraulico fissato dall'Autorità di Bacino del fiume Po relativamente all'abbassamento dei livelli nel tratto di fiume Po posto a monte della cascina Consolata e fino al ponte stradale di Casale M.. Si riporta di seguito la mappa delle differenze di livello idrico fra le due simulazioni sopra descritte.



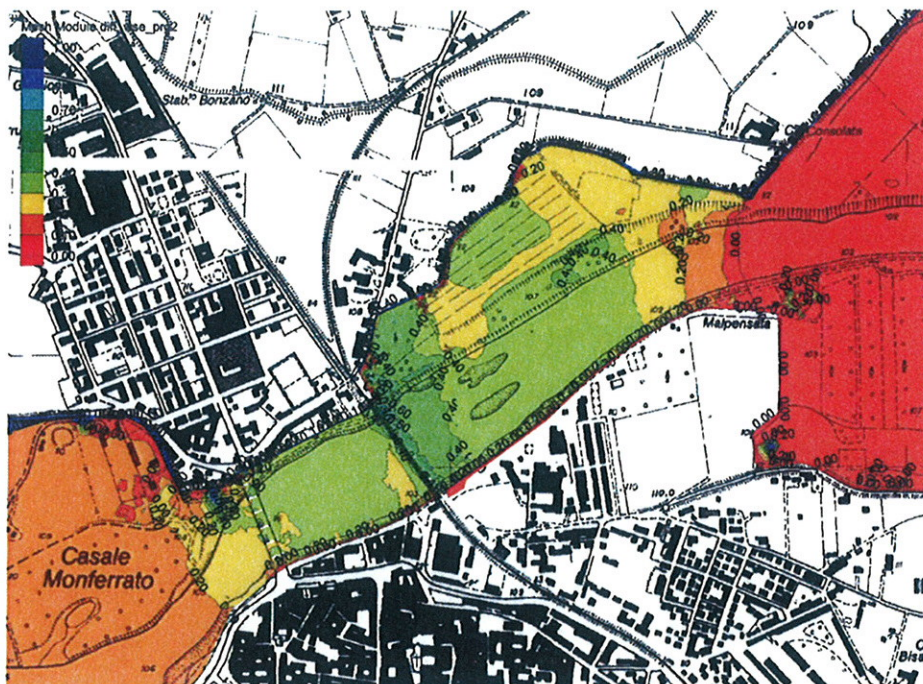


Figura 8 – Differenze di livelli idrici fra la simulazione di stato di fatto e di assetto di progetto



BATIMETRIA s.f





[illegible]



# BATIMETRIA PRGL





LIVELLI PRG2





PROGETTO 2000 DIFF. LIVELLI CON SISTO DI FATO





## ALLEGATO A – CARTOGRAFIE RELATIVE ALLA SIMULAZIONE DI STATO DI FATTO





Batimetria relativa alla configurazione di stato di fatto





Livelli idrici di stato di fatto, simulazione dell'evento dell'Ottobre 2000



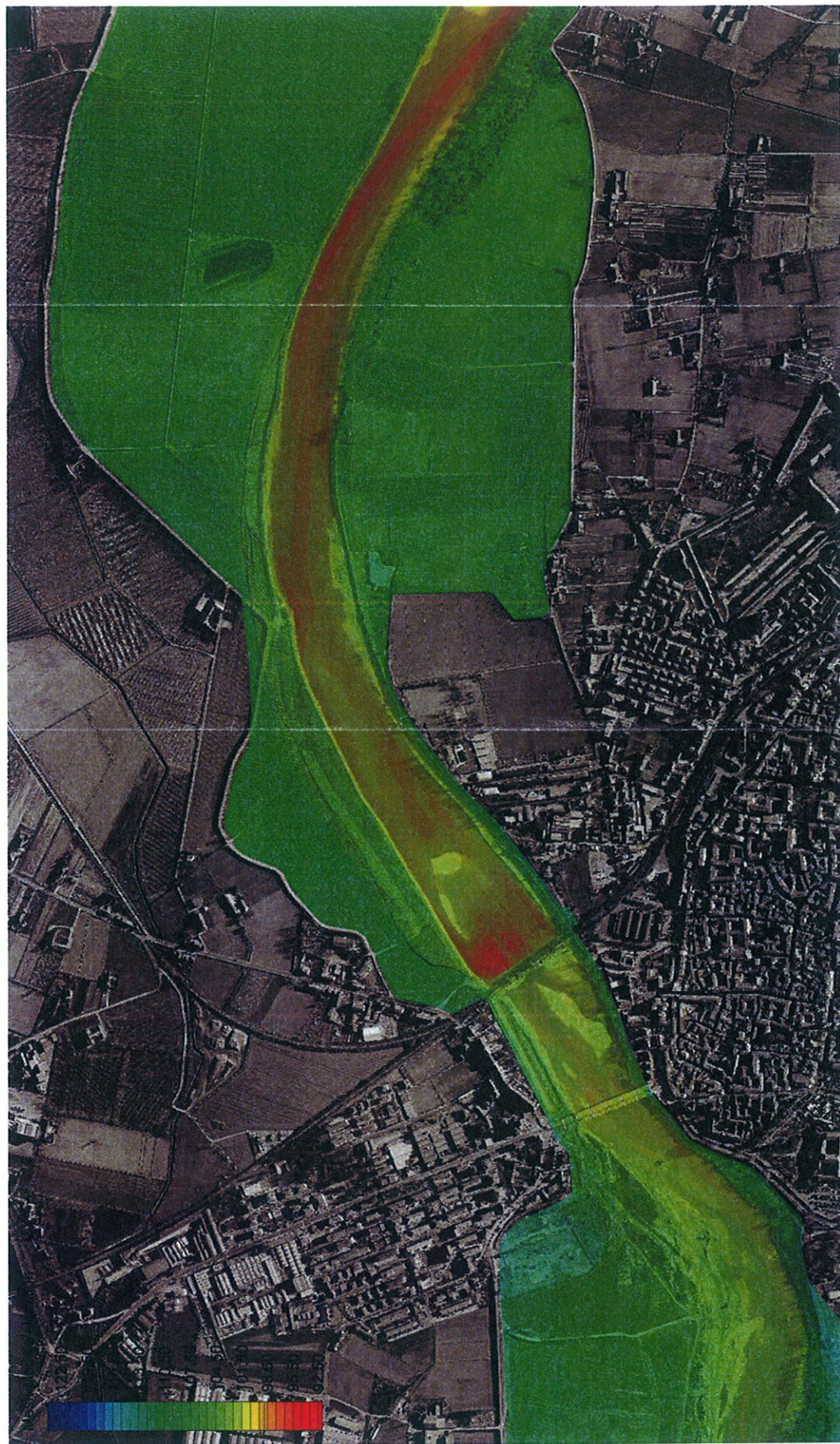


Modulo e vettori della velocità di stato di fatto, simulazione dell'evento dell'Ottobre 2000



## ALLEGATO B – CARTOGRAFIE RELATIVE ALLA SIMULAZIONE DELL'ASSETTO MIGLIORATIVO





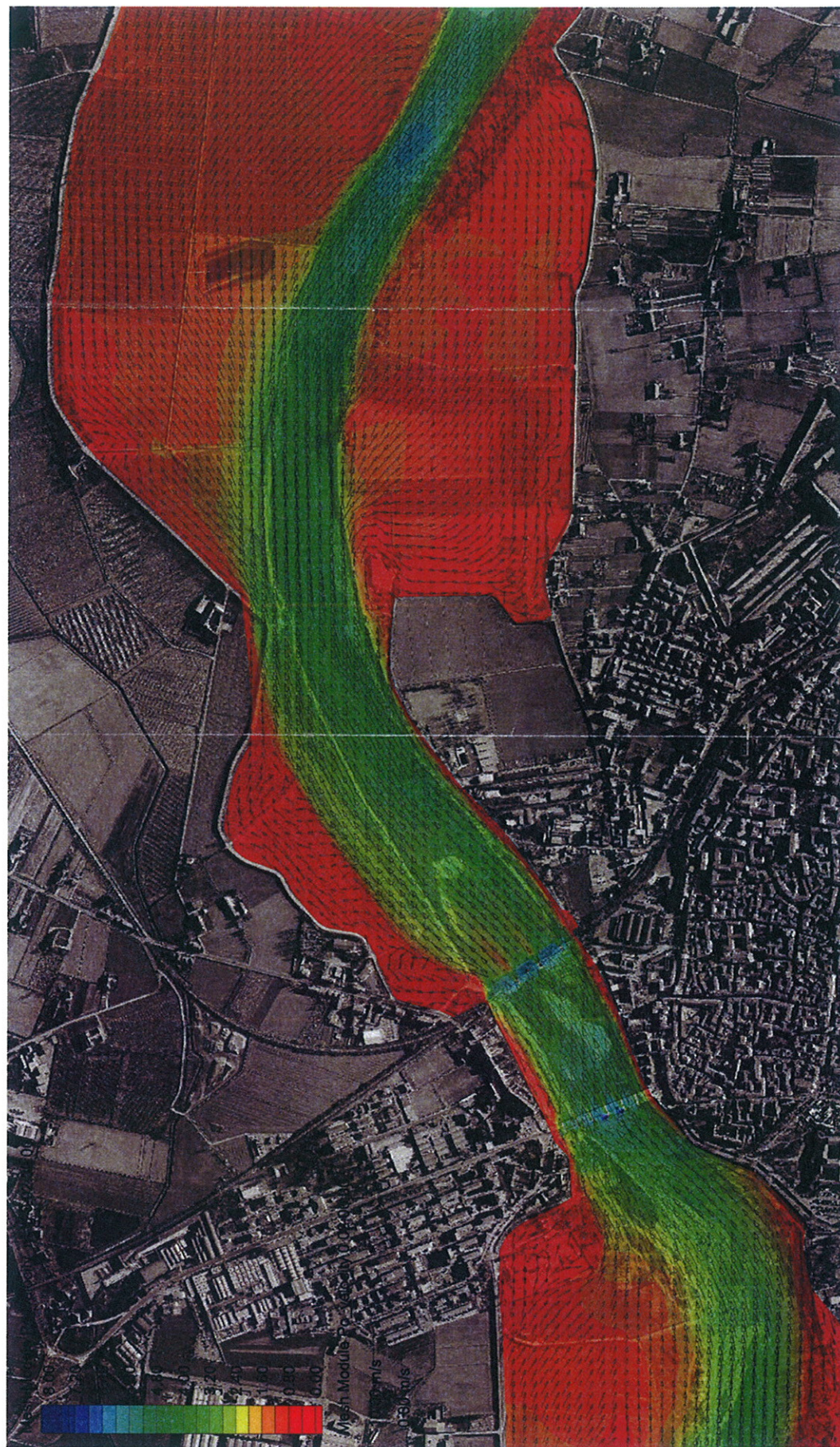
Batimetria relativa alla configurazione dell'assetto migliorativo





Livelli idrici d'assetto migliorativo, simulazione dell'evento dell'Ottobre 2000





Modulo e vettori della velocità dell'assetto migliorativo, simulazione dell'evento dell'Ottobre 2000



## **ALLEGATO C - DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO**

Il modello matematico impiegato è BASEMENT (Basic simulation environment), sviluppato dal Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW) dell'Eidgenössische Technische Hochschule – Swiss Federal Institute of Technology (ETH) di Zurigo, scaricabile gratuitamente dal sito dell'ETH.

BASEMENT è un software che può essere utilizzato nel campo dell'ingegneria fluviale e idraulica, per applicazioni quali la propagazione delle onde di piena o di dam break, descrizione delle aree di allagamento ecc.

Dal punto di vista numerico, si compone di due subsystems, BASEchain (monodimensionale) e BASEplane (bidimensionale). Nel presente studio sono stati considerati casi di moto bidimensionale, per cui è stato utilizzato solo il modulo BASEplane, che applica il metodo dei volumi finiti per risolvere le equazioni bidimensionali del moto a superficie libera.

Le equazioni del moto a superficie libera nell'approssimazione "alle acque basse" (shallow water) sono ricavate per integrazione sulla verticale delle equazioni di continuità e di Navier-Stokes supponendo che la componente verticale dell'accelerazione sia trascurabile, e che la distribuzione delle pressioni sia idrostatica. Si assume inoltre che la pendenza del fondo sia "piccola" e che sia lecito applicare leggi di resistenza valide per il moto permanente al caso di moto vario.

Nonostante tali ipotesi siano piuttosto restrittive, tali equazioni sono utilizzate per la descrizione di diversi fenomeni fisici di interesse ingegneristico quali la propagazione delle onde di piena in alvei fluviali, l'allagamento causato da rotture di rilevati arginali ovvero di dighe e/o traverse fluviali. In ambito marittimo, sono inoltre utilizzate nello studio di fenomeni caratterizzato da onde lunghe quali le maree e gli tsunami. Anche nell'analisi dei fenomeni di trasporto solido e di evoluzione morfodinamica dei corsi d'acqua l'utilizzo delle equazioni alle acque basse risulta essere molto diffuso.

Le equazioni alle acque basse dal punto di vista matematico formano un sistema bidimensionale, dipendente dal tempo, di equazioni non lineari alle derivate parziali di tipo iperbolico.

In forma differenziale e conservativa, le equazioni possono essere scritte nella forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \nabla \cdot (\mathbf{F}, \mathbf{G}) + \mathbf{S} = 0$$

dove  $\mathbf{U}$  rappresenta il vettore delle variabili conservate (altezza idrica e portate specifiche nelle direzioni  $x$  e  $y$ ),  $\mathbf{F}(\mathbf{U})$  e  $\mathbf{G}(\mathbf{U})$  sono i vettori di flusso nelle due direzioni  $x$  e  $y$ , e  $\mathbf{S}$  è il vettore dei termini sorgente:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - vh \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - vh \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - vh \frac{\partial v}{\partial x} \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 - uh \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix}$$

In queste espressioni  $h$  rappresenta la profondità idrica,  $u$  e  $v$  sono le componenti planimetriche del vettore velocità,  $g$  è l'accelerazione di gravità e  $\nu$  la viscosità cinematica.

Nei termini sorgente si annoverano gli effetti introdotti dal campo di gravità, in virtù della pendenza del fondo, e dalla resistenza del fondo stesso, che risultano:

$$S_{Bx} = -\frac{\partial z_B}{\partial x} \quad \text{e} \quad S_{By} = -\frac{\partial z_B}{\partial y}$$

$$S_{fx} = \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{g c_f^2 R} \quad \text{e} \quad S_{fy} = \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{g c_f^2 R}$$

in cui  $S_{Bx}$  e  $S_{By}$  rappresentano la pendenza del fondo (bed slope) nelle direzioni  $x$  e  $y$ ,  $z_B$  la quota del fondo,  $S_{fx}$  e  $S_{fy}$  la cadente energetica (friction slope) nelle direzioni  $x$  e  $y$ ,  $R$  il raggio idraulico e  $c_f$  è un coefficiente di resistenza che può



essere calcolato con espressioni empiriche, introducendo il coefficiente di Strickler o di Manning.

Vengono trattati come termini sorgente anche i flussi viscosi:

$$S_d = \frac{\partial F_d}{\partial x} + \frac{\partial G_d}{\partial y}$$

in cui il pedice "d" si riferisce alla diffusione:

$$F_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \nu h \frac{\partial u}{\partial x} \\ \nu h \frac{\partial v}{\partial x} \end{pmatrix} \quad e \quad G_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \nu h \frac{\partial u}{\partial y} \\ \nu h \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}$$

La soluzione del problema determinato dal sistema differenziale solitamente definito su un dominio limitato, necessita di condizioni iniziali e di condizioni al contorno.

In BASEMENT le condizioni iniziali possono essere imposte in tre modi diversi:

- "dry" (altezza d'acqua e velocità iniziali nulle in tutti gli elementi del dominio);
- "continue" (imponendo come condizione iniziale l'altezza d'acqua e la velocità che derivano da una precedente simulazione attraverso un *file.sim*);
- "index\_table" (facendo riferimento all'indice dei materiali della *mesh* ed esplicitando un valore iniziale di *h*, *u* e *v* per ciascun materiale).

In corrispondenza della sezione di monte deve essere imposta una condizione al contorno di tipo "hydrograph", ossia un idrogramma che riporti la portata transitante nella sezione di ingresso in funzione del tempo. Oltre a questo deve essere anche specificata una pendenza media, che viene usata per il calcolo iterativo dell'altezza d'acqua alle varie portate nella sezione di ingresso.

Esistono poi diverse tipologie di condizioni al contorno che possono essere imposte in corrispondenza della sezione di valle:

- "zero\_gradient": nella sezione di uscita il gradiente delle variabili altezza d'acqua e velocità è nullo, ossia i flussi entranti nelle celle del contorno escono inalterati dal dominio computazionale attraverso il bordo;

- "weir": viene calcolata la portata uscente dallo stramazzo attraverso la relazione:

$$q = \frac{2}{3} C \sqrt{2g(h_{up} - h_{weir})^3}$$

una volta specificata  $h_{weir}$ .

- "gate": in questo caso, analogamente, nota  $h_{gate}$ , la portata uscente è calcolata dalla relazione

$$q = \mu h_{gate} \sqrt{2g(h - h_{gate})}.$$

- "h-Q relation": può essere specificata una scala di deflusso per la sezione in uscita, oppure una pendenza media utilizzata nel calcolo iterativo della portata in uscita, nell'ipotesi di moto uniforme.
- "z-hydrograph": può essere specificata l'evoluzione della quota idrica nel tempo.