

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. CORPO STRADALE E GEOTECNICA

PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01

NUOVA LINEA TORINO LIONE  
TRATTA NAZIONALE

IDROLOGIA / IDRAULICA

Relazione Idraulica e di compatibilità idraulica (Torrente Sangone)

SCALA

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA / DISCIPLINA PROGR. REV.

D040 00 R 11 RI ID0002 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato
A		M. Coccato	06 2010	G. Cabas	06 2010	Della Vedova	06 2010	

File: D040 00 R 11 RI ID0002 001 A.doc

n. Elab.

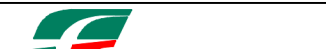
ITALFERR S.p.A.  
U.O. OPERE CIVILI  
Dott. Ing. LUIGI EVANGELISTA  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n° A23189

# INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GENERALE DEL CORSO D'ACQUA.....</b>	<b>4</b>
2.1	IL BACINO IDROGRAFICO.....	4
2.2	CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA DEL TORRENTE.....	4
<b>3</b>	<b>PORTATE DI MASSIMA PIENA .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>COMPORTAMENTO IDROMETRICO.....</b>	<b>7</b>
4.1	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO .....	7
4.2	RISULTATI DEL MODELLO MATEMATICO.....	8
4.3	CONFRONTO CON ALTRI STUDI DI CARATTERE IDRAULICO .....	8
<b>5</b>	<b>COMPATIBILITÀ IDRAULICA .....</b>	<b>12</b>
5.1	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO .....	13
5.2	NORME DI ATTUAZIONE DEL PAI .....	14
5.3	CRITERI DI COMPATIBILITÀ.....	15
5.4	DIRETTIVE DELL'AUTORITÀ DI BACINO DEL FIUME PO .....	16
5.5	FASCE DI ESONDAZIONE .....	17
5.6	RISPETTO DEI CRITERI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA.....	18
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>20</b>

**Appendice A – Descrizione del modello HEC-RAS**

**Appendice B – Risultati modellistici: Torrente Sangone**

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	3 di 42

## 1 PREMESSA

La presente relazione riporta i risultati dello studio di condotto al fine di valutare la potenziale interferenza tra il torrente Sangone, affluente di sinistra del fiume PO nel quale si getta in prossimità della città di Torino, e la linea ferroviaria Torino - Lione.

Sebbene la linea ferroviaria non prevede l'attraversamento del torrente, il suo percorso si avvicina alle sponde del corso d'acqua non è possibile escludere l'interferenza con il regime idrometrico di piena, sia per ragioni legate alla sicurezza idraulica dell'infrastruttura sia per i possibili effetti di modificazione dell'attuale equilibrio idrometrico.

Al fine di fornire le indicazioni necessarie per valutare le possibili interferenze tra corso d'acqua e infrastruttura, è stato studiato il comportamento idrometrico durante il passaggio delle onde di piena di maggiore entità. Le analisi sono state svolte sia attraverso l'acquisizione della documentazione esistente sia attraverso lo svolgimento di un'analisi di carattere idraulico, condotta mediante l'ausilio di un modello matematico.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	4 di 42

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE DEL CORSO D'ACQUA

### 2.1 Il bacino idrografico

Il torrente Sangone nasce, nella zona più esterna delle Alpi Cozie, dalle acque della Fontana Mura ubicata nel colle Roussa alla quota di 2.017 m s.m.m. Il suo bacino idrografico si estende per 268,14 km<sup>2</sup>.

Il torrente si snoda lungo un percorso di 47 km prima di confluire, da sinistra, nel fiume Po, nei pressi della città di Torino.

Scorre interamente nella valle che prende il suo nome, la Val Sangone, ubicata tra la Val di Susa (a nord, dove scorre la Dora Riparia) e la Val Chisone (a sud, dove scorre il torrente Chisone).

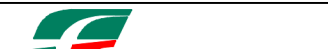
Dopo aver segnato il confine tra i comuni di Coazze e di Giaveno passa nei pressi di Trana per uscire poi nella piana torinese. Il suo percorso è per circa 21 km in territorio montuoso e per la parte restante in pianura. Dopo aver lambito i centri di Orbassano, Beinasco e Nichelino confluisce nel Po in prossimità del confine tra Torino e Moncalieri attorno a quota 220 m s.l.m.

Da Sangano in poi, a causa dei frequenti prelievi idrici dell'acquedotto di Torino, il corso del torrente si riduce a un greto quasi asciutto per gran parte dell'anno.

### 2.2 Caratterizzazione morfologica del torrente

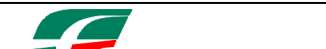
Uno studio orientato all'analisi della dinamica evolutiva del torrente Sangone (Giulietto e Luino, 2006) ha evidenziato la trasformazione morfologica subita dal torrente Sangone nel periodo dal 1752 al 2000. L'analisi delle modificazioni nell'andamento planimetrico ha messo in evidenza la tendenza ad una "semplificazione del percorso fluviale", caratterizzato in passato dalla presenza di più canali di deflusso, separati da isole, mentre sulla carta del 1991 appare ridotto ad un unico e ristretto canale, con una sensibile riduzione della sinuosità rispetto alla situazione del passato. A partire dagli anni 1930-40 a seguito dell'avvio degli interventi antropici di rilevante entità, accompagnati dalla realizzazione di opere di difesa, argini, rettifiche, ecc. il torrente ha



	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE							
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	R 11	CODIFICA RI	DOCUMENTO ID0002	001	REV. A	FOGLIO 5 di 42

subito una riduzione della larghezza trasversale. I caratteri morfologici antecedenti a questo periodo sono ancora visibili nelle immagini aeree riprese nel periodo 1954-1957 e sono poi quasi del tutto scomparse a seguito della diffusione della pratica agricola nelle medesime aree.

Seppure lo studio non riporti dati precisi in merito all'evoluzione altimetrica dell'alveo, è ragionevole presumere che il processo di riduzione della sinuosità sia correlato a un importante fenomeno di erosione generalizzata del fondo alveo, con riduzione della quota della livelletta longitudinale l'approfondimento dell'alveo principale rispetto alle fasce di esondazione esterne che, essendo più difficilmente soggette a esondazioni, hanno favorito l'estensione delle coltivazioni.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	6 di 42

### 3 PORTATE DI MASSIMA PIENA

Il bacino del fiume Po e i suoi affluenti principali, sono stati oggetto di studi specifici per la caratterizzazione del regime idrologico e idrometrico. Questi studi sono stati raccolti e integrati da parte dell'Autorità di Bacino del fiume Po e i risultati sono stati pubblicati nello stesso PAI. Le analisi alle quali si fa normalmente riferimento sono basate su elaborazioni statistiche condotte a partire dalle registrazioni idrometriche provenienti dai sensori ubicati lungo l'asta dei principali corsi d'acqua che compongono il reticolo idrografico del fiume Po.

Il torrente Sangone non rientra tra i bacini idrografici studiati con dettaglio dall'AdB-PO e non sono state individuate valutazioni di tipo idrologico o idraulico per tale corso d'acque all'interno della documentazione che costituisce il PAI.

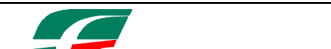
Uno studio di approfondimento conoscitivo è quello redatto dalla Provincia di Torino (1997, 2000) che ha fornito una serie di informazioni utili per l'inquadramento del bacino idrografico e giustificato il valore della portata di piena come di seguito elencati:

$$Q_{50} = 690 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{200} = 820 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{500} = 900 \text{ m}^3/\text{s}$$

Le portate sono state ottenute mediante analisi supportata dall'implementazione di un modello idrologico.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	7 di 42

## 4 COMPORTAMENTO IDROMETRICO

### 4.1 Implementazione del modello matematico

Per una migliore definizione del comportamento idrometrico del torrente Sangone è stato implementato il modello matematico HEC-RAS lungo un tratto di lunghezza di quasi 3 km.

Il tratto è stato delimitata a valle in prossimità del punto in cui il torrente entra nel territorio comunale di Beinasco e a monte fino alla zona delimitata come fascia C, e quindi potenzialmente esondabile per eventi atteso con periodo di ritorno di 500 anni.

La geometria delle sezioni dell'alveo sono state ricavate dalla Carta Tecnica Regionale, acquisita in formato vettoriale, nella quale viene riportato l'andamento plano-altimetrico degli elementi che definiscono la morfologia fluviale, comprendendo le linee spondali, i canali attivi dell'alveo, i piani golenali adiacenti.

Le sezioni ottenute hanno coperto interamente le aree potenzialmente esondabili, come definite nel PSFF.

Le sezioni sono state inserite nel modello idraulico con numerazione crescente da valle verso monte.

La scabrezza è stata definita imponendo un coefficiente di Manning piuttosto elevato, pari a  $n=0.05$ , data la conformazione dell'alveo che presenta barre di deposito consolidato con presenza di fitta vegetazione.

Nella sezione di valle è stato ipotizzato un comportamento idraulico a moto uniforme, secondo la pendenza media pari a quella misurata dal profilo longitudinale ricostruito a partire dalle sezioni trasversali acquisite.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno di monte, sono state assunte tre differenti portate di piena, a simulazione di tre differenti scenari di piena coincidenti con quelli di riferimento per il PAI ( $Tr = 50, 200$  e  $500$  anni).

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE							
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001	A	8 di 42

## 4.2 Risultati del modello matematico

Le simulazioni condotte nell'ipotesi di moto permanente, hanno consentito di determinare i livelli idrometrici assoluti che si determinano al passaggio del colmo della piena (vedi appendice B).

I risultati evidenziano la tendenza all'esondazione in corrispondenza del tratto più a valle, nelle vicinanze del territorio di Beinasco, specialmente sulla sinistra idraulica.

Risalendo verso monte, la sezione di deflusso assume una conformazione incassata entro sponde di notevole altezza che l'escursione idrometrica non riesce a superare. Non vengono pertanto individuate ulteriori aree di esondazione. Si nota inoltre che la differenza di quota idrometrica tra differenti scenari di piena si mantiene su pochi decimetri, data la notevole larghezza della superficie liquida assume in regime di piena. Tale conclusione contrasta con il quadro fornito dalla delimitazione delle fasce fluviali ricavata dal PSFF che indica una notevole estensione di aree esondabili seppure per un evento di piena particolarmente catastrofico, come quello previsto per un tempo di ritorno di 500 anni.

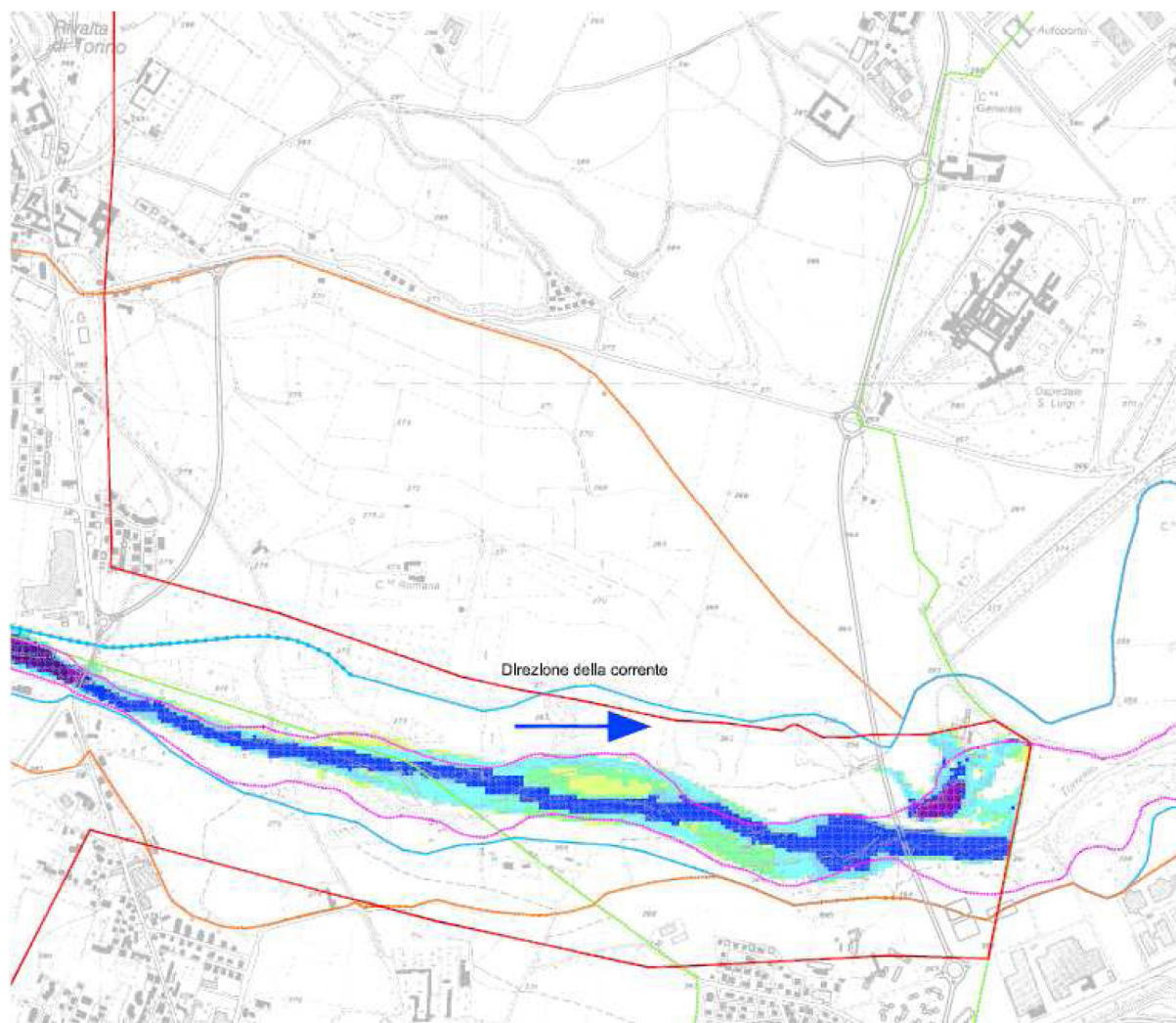
In particolare, l'area interessata dal passaggio della linea ferroviaria, non risulterebbe esondata neppure per un evento di questa entità.

## 4.3 Confronto con altri studi di carattere idraulico

A titolo di confronto sono stati analizzati i risultati dello studio condotto dal comune di Beinasco (2008, 2009) e dal comune di Rivalta di Torino (2009), al fine di valutare la compatibilità idraulica di rispettive Varianti al Piano Regolatore Generale Comunale.

Gli studi idraulici, condotti mediante un modello idraulico bidimensionale, per l'approfondimento della dinamica torrentizia e dell'interferenza con l'uso del suolo dedotto dalle previsioni urbanistiche, hanno evidenziato una buona coerenza, in termini di estensione delle aree esondabili, con i risultati ottenuti in questo lavoro.

Particolarmente interessanti in questo senso risultano essere i risultati ottenuti dallo studio condotto per conto del Comune di Rivalta di Torino (vedi Figura 4-1).



### Legenda

- Profondità d'acqua fino a 0.02 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 0.02 e 0.4 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 0.4 e 1.0 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 1.0 e 1.5 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 1.5 e 2.0 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 2.0 e 2.5 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 2.5 e 3.0 m
  - Profondità d'acqua compresa tra 3.0 e 4.0 m
  - Profondità d'acqua > di 4.0 m
  - Limite (\*) tra la fascia A e la fascia B
  - Limite (\*) tra la fascia B e la fascia C
  - Limite (\*) esterno della fascia C
  - Limite (\*) di progetto tra la fascia B e la fascia C
- (\*) Il limite è individuato dal bordo interno del graficismo

Figura 4-1 – Risultati ottenuti dallo studio del comune di Rivalta di Torino per  $Tr=500$  anni



 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	10 di 42

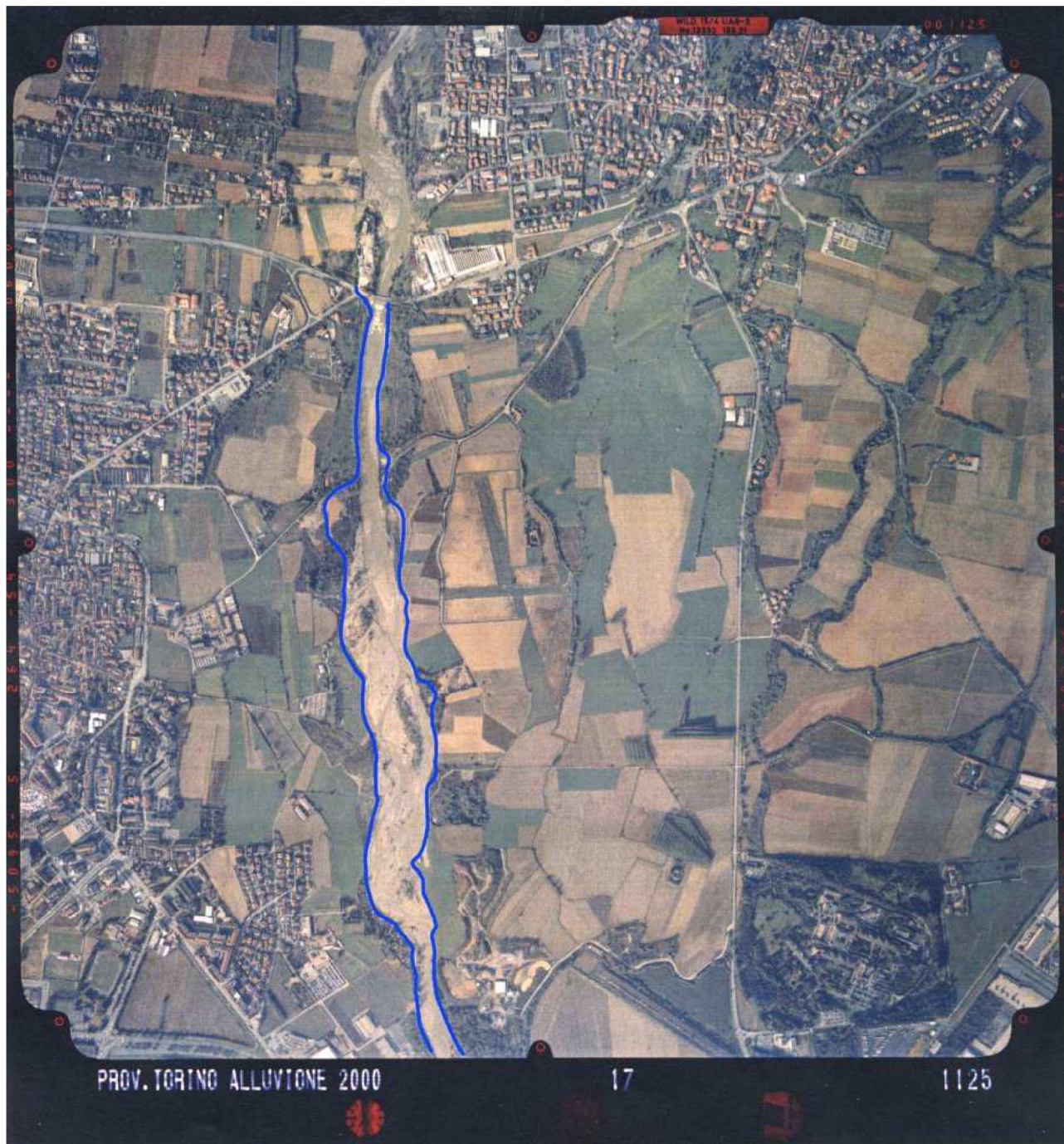
La figura riporta l'inviluppo dei massimi tiranti raggiunti durante la simulazione matematica di uno scenario di piena atteso con tempo di ritorno di 500 anni. Si può osservare che la corrente si mantiene entro la fascia d'esondazione A.

I risultati del modello matematico 2D confermano la tendenza all'espansione delle acque sulla sinistra idraulica presso la sezione n.1, utilizzata per l'impostazione delle condizioni al contorno di valle del modello matematico.

Un'altra considerazione, a supporto della buona rispondenza del modello implementato, viene suggerita dalle immagini fotografiche riprese da aereo, nel periodo immediatamente successivo al passaggio dell'onda di piena del 2000, riportate nello studio condotto dalla Provincia di Torino (2000) con particolare riferimento all'allegato 1 *"Delimitazione sui rilievi aero-fotogrammetrici post-alluvione delle aree allagate nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2000"*. La delimitazione ricavata dalle immagini aeree, delle quali si riporta in Figura 4-2 lo stralcio relativo al tratto di nostro interesse, evidenzia come la fascia esondata durante il passaggio dell'onda di piena sia rimasta all'interno delle sponde incise del torrente senza dar luogo ad alcuna esondazione ad eccezione di punti localizzati in prossimità delle immissioni di collettori di drenaggio secondari.

Valutazioni di tipo idrologico, hanno assegnato all'evento di piena del 2000 un tempo di ritorno di 20-50 anni.

Il confronto tra risultati dell'analisi idraulica qui presentata con i risultati di altri studi confermano che l'area interessata dal passaggio della linea ferroviaria in progetto non rientra in aree esondabili per nessuno degli scenari di piena considerati.



171125

*Figura 4-2 – Delimitazione sui rilievi aerofotogrammetrici post-alluvione delle aree allagate nel corso dell'evento di piena dell'ottobre 2000 (Provincia di Torino, 2000).*



	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 12 di 42

## 5 COMPATIBILITÀ IDRAULICA

Il sistema idrografico interferente con il tracciato della linea ferroviaria Torino – Lione, collegamento Val di Susa – Settimo Torinese, appartiene al sistema degli affluenti di sinistra del fiume Po, nella parte occidentale della regione Piemontese. In particolare, il Torrente Sangone è incluso nel sistema dei “Sottobacini Piemontesi” come evidenziato in Figura 5-1.

Le competenze in materia di pianificazione idraulica sono demandate all’Autorità di Bacino del fiume Po.

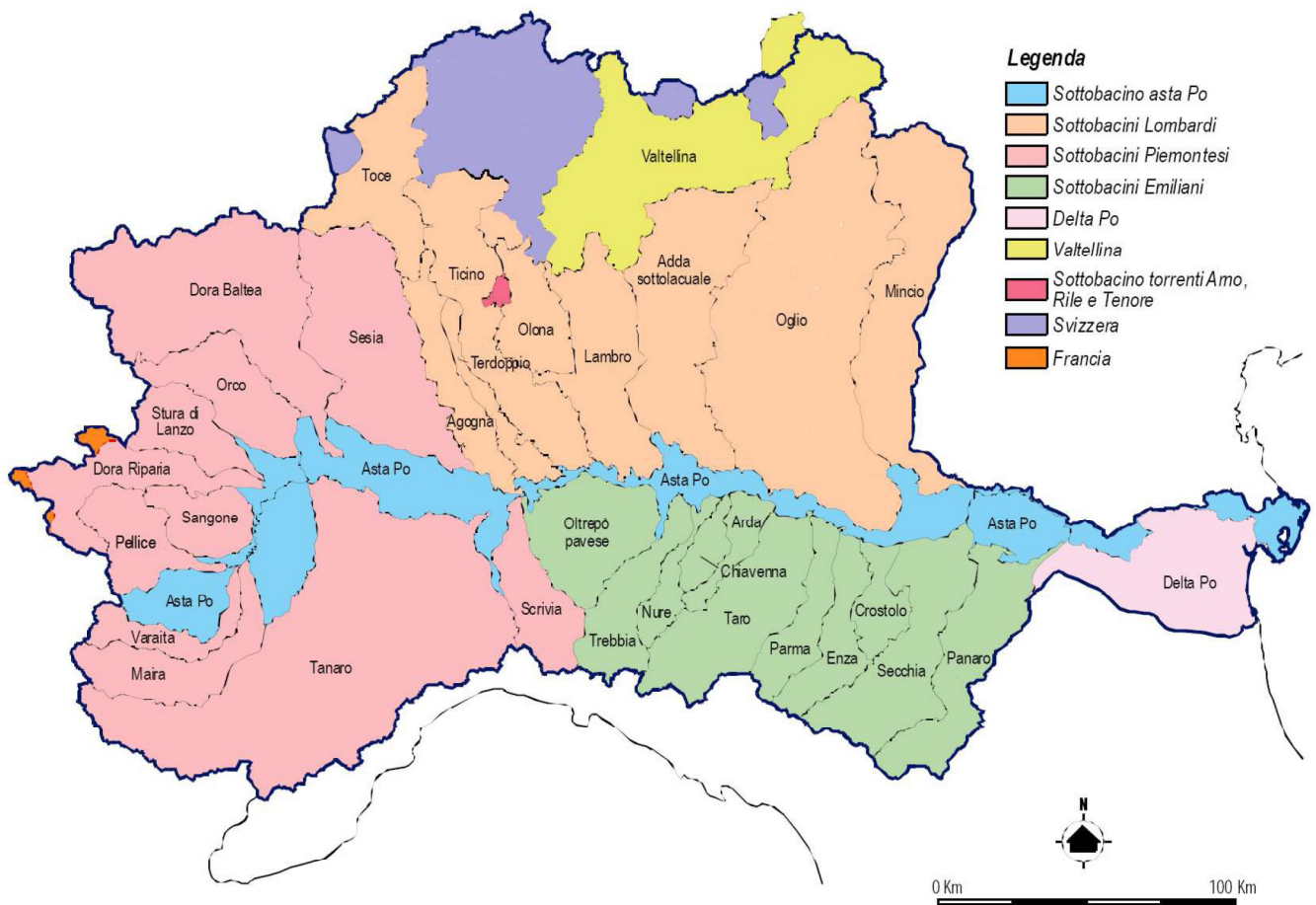
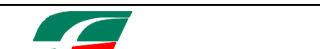


Figura 5-1 - Principali sottobacini idrografici del fiume Po.

I vincoli d’uso del territorio e le direttive in materia di progettazione di opere idrauliche, sono contenute nel Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI) redatto dalla stessa

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	13 di 42

Autorità di Bacino e approvato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 aprile 2001.

In questo capitolo vengono analizzati i documenti contenuti nel PAI, i vincoli e le direttive da considerare nella progettazione, al fine di garantire la compatibilità idraulica del progetto. Tali documenti sono diretti a fornire:

- le prescrizioni sulle metodologie di studio e sulle portate di progetto;
- la mappatura del territorio a rischio di esondazione;
- le direttive per la progettazione.

## 5.1 Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico


Il "Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico" rappresenta l'atto di pianificazione, per la difesa del suolo dal rischio idraulico e idrogeologico, conclusivo e unificante di due strumenti di pianificazione precedentemente approvati, ovvero:

- il "*Piano stralcio per la realizzazione degli interventi necessari al ripristino dell'assetto idraulico, alla eliminazione delle situazioni di dissesto idrogeologico e alla prevenzione dei rischi idrogeologici nonché per il ripristino delle aree di esondazione*", realizzato a seguito della piena del novembre 1994;
- il "*Piano Stralcio delle Fasce Fluviali*" (PSFF), relativo alla rete idrografica principale del sottobacino del Po sotteso alla confluenza del Tanaro (territorio della Regione Piemonte e Valle d'Aosta) e, per la restante parte del bacino, all'asta del Po e agli affluenti emiliani e lombardi, limitatamente ai tratti arginati.

Il "*Piano Stralcio delle Fasce Fluviali*" (PSFF) è stato approvato con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri il 24 luglio 1998. Esso contiene la definizione e la delimitazione cartografica delle fasce fluviali dei corsi d'acqua principali piemontesi, del fiume Po e dei corsi d'acqua emiliani e lombardi, limitatamente ai tratti arginati a monte della confluenza in Po.

Il PAI estende la delimitazione delle fasce fluviali ai rimanenti corsi d'acqua principali del bacino, per i quali assume la normativa relativa alla regolamentazione degli usi del suolo e degli interventi nei territori fluviali delimitati già approvata nell'ambito del PSFF.

Il PAI rappresenta uno stralcio funzionale del Piano di Bacino che costituisce, sulla base

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 14 di 42

della definizione fornita dalla legge 183/89, il principale strumento di pianificazione di tutte le componenti connesse all'ambiente idrogeologico, dalla qualità delle acque, alla difesa contro i fenomeni alluvionali e gravitativi, alla gestione della risorsa idrica, all'individuazione dei piani di intervento.

Per quanto riguarda la rete idrografica interferente con il tracciato ferroviario, per tutti e tre i corsi d'acqua precedentemente, il PAI riporta la delimitazione delle aree esondabili durante la propagazione di onde di piena di entità eccezionale e indicate come Fascia A, B e C. Queste aree di esondazione sono state riportate nelle tavole planimetriche allegate.

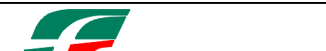
## 5.2 Norme di attuazione del PAI

Le *Norme di attuazione* del Piano individuano specifici strumenti di immediata validità una volta approvato il piano, ovvero definisce indirizzi o direttive che saranno applicati dai soggetti competenti. Costituiscono la parte fondamentale del Piano che definisce non solo le prescrizioni e i vincoli ma precisa anche le forme e i criteri di applicazione nonché le attribuzioni e le responsabilità ai diversi livelli della pubblica Amministrazione, sulla base dell'ordinamento istituzionale vigente, e le relative procedure.

Le Norme di attuazione sono divise in due sezioni distinte:

- il *Titolo I* "Norme generali per l'assetto della rete idrografica e dei versanti" riguarda, in generale, le finalità e gli effetti del Piano e definisce le modalità di attuazione di tutti gli interventi, strutturali e non, individuati dal Piano stesso;
- il *Titolo II* "Norme per le fasce fluviali" riguarda in specifico i corsi d'acqua oggetto di delimitazione delle fasce nell'ambito del PAI e riprende per essi, senza apportare modifica alcuna, la normativa approvata nell'ambito del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali;
- il *Titolo III* "Derivazioni di acque pubbliche e attuazione dell'art. 8, comma 3, della legge 102/90" comprende disposizioni generali che riguardano le modalità di rilascio e controllo delle derivazioni e stabilisce, per la Valtellina, i criteri e le prescrizioni per il rilascio di nuove derivazioni idroelettriche sulla base del bilancio idrico.



 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	15 di 42

Definiscono, in generale, le finalità e gli effetti del Piano e regolamentano le attività di uso e trasformazione del suolo maggiormente interagenti con lo stato di rischio presente sul territorio del bacino, nonché le modalità di attuazione degli interventi strutturali di difesa.

Esse completano e integrano il quadro normativo di settore definito nei due precedenti Piani stralcio: il PS 45 - *Piano stralcio per la realizzazione degli interventi necessari al ripristino dell'assetto idraulico, alla eliminazione delle situazioni di dissesto idrogeologico e alla prevenzione dei rischi idrogeologici nonché al ripristino delle aree di esondazione* - approvato ai sensi della legge 21 gennaio 1995, n. 22 con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 9 del 10 maggio 1995, e il PSFF – *Piano Stralcio delle Fasce Fluviali*, adottato ai sensi della legge 18 maggio 1989, n. 183 con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 26 del 11 dicembre 1997 e Approvazione con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri il 24 luglio 1998.

### 5.3 Criteri di compatibilità

I criteri di compatibilità definiti all'art. 38 delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico prescrivono che gli interventi *"non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche di particolare rilevanza naturale dell'ecosistema fluviale che possono aver luogo nelle fasce, che non costituiscano significativo ostacolo al deflusso e non limitino in modo significativo la capacità di invaso, e che non concorrano ad incrementare il carico insediativo"*. Tale indicazione rappresenta l'elemento principale per la valutazione di compatibilità.

In particolare l'Art. 9 (*Realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico*) e soprattutto l'art. 10 (*Infrastrutture di attraversamento*), citano:

*All'interno della fascia A – B è consentita la realizzazione di opere pubbliche o di interesse pubblico, riferite a servizi essenziali non altrove localizzabili, a condizione che:*

- *non modifichino i fenomeni idraulici naturali e le caratteristiche bio-ecologiche del fiume e delle rive;*
- *non costituiscano significativo ostacolo al deflusso;*
- *non limitino in modo significativo la capacità di invaso;*

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	001	REV. A	FOGLIO 16 di 42

- *non concorrano ad incrementare il carico insediativo.*

*Tali progetti devono essere accompagnati da uno studio di compatibilità predisposti in conformità alla direttiva “Criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all’interno delle fasce A e B” adottata dal Comitato Istituzionale con Deliberazione n. 2 dell’11 maggio 1999.*

Gli effetti principali da considerare sono i seguenti:

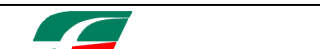
- E.1. Modifiche indotte sul profilo inviluppo di piena;
- E.2. Riduzione della capacità di invaso dell’alveo;
- E.3. Interazioni con le opere di difesa idrauliche (opere di sponda e argini) esistenti;
- E.4. Opere idrauliche in progetto nell’ambito dell’intervento;
- E.5. Modifiche indotte sull’assetto morfologico planimetrico e altimetrico dell’alveo di inciso e di piena;
- E.6. Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale;
- E.7. Condizioni di sicurezza dell’intervento rispetto alla piena.

Ai sensi del comma 2 dell’art. 38 delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico, i ponti e i viadotti di attraversamento e le linee ferroviarie sono da sottoporre a specifico parere dell’Autorità di bacino.

#### **5.4 Direttive dell’Autorità di Bacino del fiume PO**

Un riferimento tecnico di particolare importanza per la progettazione di interventi di difesa idraulica o di opere interferenti con il corso d’acqua è costituito dalla “*Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica*” approvata come allegato tecnico del PAI. La direttiva contiene, tra le altre cose, le indicazioni per il calcolo delle portate di piena sui bacini idrografici di piccole dimensioni ovvero le procedure adottabili per la stima della portata di piena in un corso d’acqua.

La direttiva consiglia l’utilizzo di differenti procedure in funzione della disponibilità di dati

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	17 di 42

che possono essere suddivise in due categorie di metodi:

- l'impiego di modelli di regionalizzazione del dato idrometrico, costruiti tramite l'analisi statistica dei dati idrologici disponibili relativi a una porzione di territorio ("regione idrologica") omogenea rispetto ai fenomeni di piena;
- l'analisi statistica delle osservazioni pluviometriche relative al bacino idrografico sotteso dalla sezione di interesse e impiego di modelli afflussi deflussi per la trasformazione in portate.

Ai fini del presente giudizio di compatibilità idraulica due dei tre corsi d'acqua in studio sono stati oggetto di valutazioni idrologiche direttamente pubblicate nello stesso PAI mentre, per quanto riguarda il torrente Sangone, privo di valutazioni da parte dell'Autorità di bacino, sono stati utilizzati i risultati di uno studio condotta dalla provincia di torino (1997, 2000).

## 5.5 Fasce di esondazione

Pur non essendo stato oggetto di uno studio di carattere idraulico, specifico per l'individuazione delle aree potenzialmente soggette a esondazione durante il passaggio delle piene fluviali, l'Autorità di Bacino è pervenuta a una mappatura delle fasce fluviali lungo le aree golenali del torrente.

Le analisi, basate su metodologie specifiche, hanno portato alla delimitazione delle fasce fluviali nell'ambito del Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF) e del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), facendo riferimento a eventi alluvionali caratterizzati da tempi di ritorno di 50, 200 e 500 anni.

L'Autorità di Bacino, nella delimitazione delle fasce fluviali del torrente Sangone, ha adottato il criterio di considerare come fascia A, la parte dell'alveo entro il quale defluisce l'80% della portata di piena 200 anni, dove è prevista una velocità della corrente pari almeno a 0.40 m/s e comunque comprensiva delle forme fluviali potenzialmente attive. Si tratta del criterio più restrittivo tra quelli adottati con il PSFF.

La linea ferroviaria Torino Lione si avvicina al torrente Sangone all'altezza di Rivalta di Torino e Orbassano, mantenendosi sulla sinistra idrografica, in un tratto in cui il torrente presenta un'ampia zona golenale. Tale zona golenale risulta interessata dalla fascia di

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO		CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	18 di 42

esondazione B solo a ridosso del torrente mentre nel tratto di interesse l'area ricade nella fascia C. Secondo la delimitazione riportata nel PAI, la linea ferroviaria risulta quindi interessata da eventi di piena con tempo di ritorno di 500 anni.

## 5.6 Rispetto dei criteri di compatibilità idraulica

Le valutazioni di carattere idraulico condotte, l'analisi del tracciato ferroviario e della sua interferenza con le aree di esondazione, consentono di avanzare alcune conclusioni in merito alla compatibilità idraulica dell'infrastruttura.

I risultati del modello matematico implementato hanno evidenziato l'instaurarsi di livelli idrometrici, anche in caso di piena eccezionale come quella attesa con tempo di ritorno di 500 anni, inferiori al piano campagna adiacente alle sponde del torrente lungo tutta l'area interessata dal passaggio della ferrovia.

E' possibile concludere che non verrà diminuita la capacità di invaso fluviale in quanto la realizzazione della linea ferroviaria e dei rilevati di approccio dei ponti non producono effetti di barriera alla libera espansione delle acque. Con riferimento al torrente Sangone, i risultati del modello idraulico indicano come "non esondabili" le aree interessate dal passaggio della linea ferroviaria anche se indicate come fascia C nella perimetrazione riportata nel PSFF.

Tali conclusioni sono state suggerite dai risultati, in termini di livelli idrometrici di piena, ottenuti da un'analisi idraulica preliminare, non supportata da rilievi topografici di precisione; tuttavia, il confronto con i risultati ottenuti da altri studi di recente esecuzione e con le informazioni ricavate a seguito del passaggio dell'evento di piena del 2000, sembrano assegnare alle valutazioni un sufficiente livello di attendibilità.

.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	19 di 42

## 6 CONCLUSIONI

L'analisi idraulica esposta in questa relazione ha inteso fornire una valutazione preliminare del comportamento idrometrico del torrente Sangone potenzialmente interferente con il tracciato della linea ferroviaria Torino – Lione, per quanto il tratto incluso nel territorio comunale di Orbassano.

La caratterizzazione idrologica del corso d'acqua è stata desunta dai risultati di precedenti studi e ha fornito le condizioni al contorno per la ricostruzione degli scenari di piena assunti ai fini progettuali.

Le analisi di tipo idraulico sono state condotte mediante il modello matematico HEC-RAS, implementato da informazione ricavate dalla Carta Tecnica Regionale.

I risultati ottenuti dal modello sono stati confrontati con quanto ottenuto nel corso di altri studi analoghi, condotti in tratti limitrofi. Nonostante il grado di dettaglio non elevato dell'informazione topografica, il confronto ha evidenziato una buona attendibilità dei risultati in termini di quote idrometriche raggiunte e delimitazione delle aree esondabili.

La ricostruzione del regime idrometrico del torrente, con riferimento ai principi dettati dalle norme di attuazione del *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del fiume Po*, ha portato ad un giudizio di compatibilità idraulica dell'infrastruttura.



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	20 di 42

## 7 BIBLIOGRAFIA

Autorità di Bacino del fiume Po (2001). *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI)*.  
 Adottato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 aprile 2001.

Comune di Beinasco (2008). *Verifiche di compatibilità idraulica delle previsioni dello strumento urbanistico (PRGC) ai sensi dell'art. 18, comma 2, del Piano per l'Assetto Idrogeologico*.

Comune di Beinasco (2009). *Verifiche di compatibilità idraulica delle previsioni dello strumento urbanistico (PRGC) ai sensi dell'art. 18, comma 2, del Piano per l'Assetto Idrogeologico - Integrazioni*.

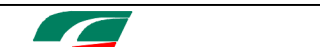
Comune di Rivalta di Torino (2009). *Variante Generale al PRGC vigente – Progetto Definitivo – Risultati della simulazione in moto vario per il Torrente Sangone: transito della portata al colmo con  $T_r = 50, 200$  e  $500$  anni*. Aggiornamento dicembre 2009.

Provincia di Torino (1997). *Studio idrogeologico e ambientale dell'intero bacino del torrente Sangone*.

Provincia di Torino (2000). *Studio idrogeologico e ambientale dell'intero bacino del torrente Sangone. Aggiornamento delle proposte di intervento formulate negli studi promossi dalla Provincia di Torino a seguito dell'evento alluvionale del 13-16 ottobre 2000*.

Regione Piemonte (2000). *Rapporto sull'evento alluvionale del 13 - 16 ottobre 2000*. A cura della Direzione Regionale Servizi Tecnici di Prevenzione.

Giulietto W, Luino F. (2006). *Utilizzo di un'analisi multidisciplinare per la delimitazione delle aree potenzialmente inondabili: il caso del Torrente Sangone presso la confluenza con il Fiume Po (prov. di Torino)*. Giornale di Geol. Applicata n. 4, 57-64.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	21 di 42

## APPENDICE A – DESCRIZIONE DEL MODELLO HEC-RAS

Si riporta la descrizione degli algoritmi di calcolo alla base del modello matematico HEC-RAS utilizzato nel presente lavoro ai fini delle verifiche idrauliche delle opere di attraversamento stradali interferenti con il sistema idrografico.

Le procedure di calcolo descritte nelle seguenti pagine si limitano agli algoritmi effettivamente utilizzati ovvero a quelli che consentono la simulazione dei profili idrometrici operando in regime di moto permanente ed in corrente mista (sub e supercritica).

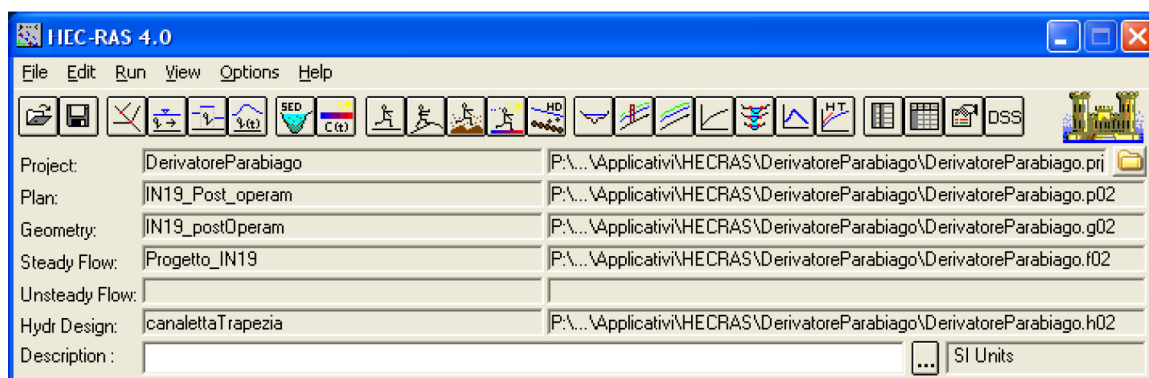
### A.1 Obiettivi e capacità di elaborazione

Il modello di simulazione HEC-RAS è stato inizialmente sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA) per lo studio delle correnti nelle reti di canali aperti, attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in regime subcritico e supercritico, operando nell'ipotesi di monodimensionalità del flusso.

HEC-RAS rappresenta l'evoluzione del noto modello HEC-2, che fornisce tuttora la base di calcolo della versione attuale e al quale sono state aggiunte numerose altre funzioni e strumenti di analisi. In particolare, a partire dalla versione 3.1 è stato integrato con gli algoritmi di calcolo del modello idraulico UNET One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico. Successivamente, nel Marzo del 2008 con la distribuzione della versione 4.0, il modello ha acquisito ulteriori capacità di simulazione, principalmente orientate alle valutazioni di trasporto solido, che lo rendono adatto a simulare profili di piena nell'ipotesi di fondo mobile in regime quasi vario ed a fornire previsioni sulle tendenze evolutive degli alvei. Quest'ultima è la versione utilizzata nella presente analisi.

Obiettivo principale del modello, utilizzato nell'ipotesi di moto permanente, è quello di correlare l'entità della portata liquida in arrivo dal bacino di monte con le velocità e con l'altezza idrometrica raggiunta nell'alveo principale e nelle golene.

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	001	REV. A	FOGLIO 22 di 42



*Figura A.7-1 - Finestra principale del modello HEC-RAS*

Pur operando nell'ipotesi di monodimensionalità, il modello consente la ricostruzione dell'andamento della velocità all'interno di una stessa sezione di deflusso, distinguendo tra zone spondali e canale centrale, in funzione della variazione di scabrezza e di tirante idraulico.

Nel caso della simulazione in moto permanente il calcolo dell'andamento dei profili idraulici viene effettuato dal modello utilizzando un metodo numerico chiamato "standard step method", che risolve in modo sequenziale l'equazione monodimensionale dell'energia fra due sezioni adiacenti trasversali al moto.

In corrispondenza ad alcune tipologie di ponte, dove nascono condizioni di flusso complesse, vengono utilizzate invece specifiche equazioni dell'idraulica per determinare le variazioni di livello dovute a queste varie singolarità.

Sinteticamente, il modello funziona calcolando le variazioni di livello idrometrico tra sezioni trasversali adiacenti sulla base del calcolo delle perdite di energia. Il calcolo comincia a un'estremità del tronco d'alveo indagato, procedendo passo-passo sino all'altra estremità, e così sezione dopo sezione, cambiando il verso dell'indagine da valle verso monte per moto subcritico e da monte verso valle per moto supercritico.

Il funzionamento del modello HEC-RAS si basa su alcune semplificazioni nelle ipotesi di partenza:

- moto permanente;
- moto gradualmente vario;
- moto monodimensionale, con correzione della distribuzione orizzontale della

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	23 di 42

velocità;

- perdite di fondo mediamente costanti fra due sezioni trasversali adiacenti;
- arginature fisse.

Come altri programmi di simulazione, HEC-RAS non va considerato come una semplice “black box”, ma è invece molto importante l’accuratezza dei dati forniti come input per ottenere dei risultati di buona qualità; alla base della definizione di tutti i parametri utilizzati dal modello sta infatti un accurato studio del bacino e delle interazioni fra corso d’acqua e ambiente circostante.

## A.2 Definizioni

Il modello utilizza, all’interno dei suoi algoritmi di calcolo, elementi dell’idraulica dei canali a pelo libero. Si ritiene opportuno, quindi, prima di procedere oltre, inserire alcuni elementi per meglio chiarire il funzionamento del modello stesso.

### Moto permanente e vario

Il criterio di distinzione fra i due tipi di moto è il loro andamento nei confronti della variabile “tempo”. Se profondità, velocità e portata rimangono costanti nel tempo in una determinata sezione di un corso d’acqua, il moto è permanente; se una di queste caratteristiche varia, il moto è vario. Il passaggio di un’onda di piena lungo un tronco d’alveo è un esempio di moto vario perché profondità, velocità e portata cambiano nel tempo.

La ragione per cui HEC-RAS, modello di moto permanente, può essere usato per il moto vario, come è da considerarsi a rigore un’onda di piena, sta nella lentezza con cui l’onda cresce e si esaurisce. Un ipotetico osservatore sulla sponda di un corso d’acqua non è infatti in grado di apprezzare la curvatura dell’onda e non apprezza le variazioni istantanee di livello che si verificano.

Eccetto quindi casi estremi, la variazione di portata avviene gradualmente e i risultati ottenuti usando metodi analitici per moto permanente sono ugualmente di buona qualità.

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 24 di 42

### Moto uniforme e vario

Quando il moto è uniforme, profondità e velocità sono costanti lungo un tratto di canale. La forza di gravità provoca il movimento dell'acqua, in equilibrio con gli attriti. Il moto non è accelerato né decelerato. Per un canale naturale non si può parlare di moto uniforme in senso stretto, perché la geometria delle sezioni trasversali e l'area bagnata variano lungo il canale, causando accelerazioni e decelerazioni del moto. A rigore il moto uniforme è possibile solo in un canale prismatico con sezione e pendenza costanti. D'altra parte è considerato corretto assumere che il moto sia uniforme quanto il pelo libero è approssimativamente parallelo al fondo del canale; in tal caso si assume che anche la linea dell'energia sia parallela al fondo.

Nel caso di moto vario profondità e velocità cambiano con la distanza lungo il canale; si può distinguere tra moto "gradualmente vario" quando le variazioni nell'altezza del pelo libero avvengono in una distanza relativamente lunga e modo "rapidamente vario" se le variazioni sono brusche.

Quest'ultima distinzione è importante in quanto HEC-RAS calcola i profili solamente in situazioni di moto gradualmente vario.

### Moto subcritico e supercritico

Il moto in un canale a pelo libero può essere classificato come subcritico, supercritico o critico.

La determinazione del tipo di moto secondo questa classificazione è di fondamentale importanza nell'utilizzo del modello, perché cambia il verso in cui si procede nello studio del profilo idraulico partendo da una delle due estremità del tratto d'alveo in esame.

Le perturbazioni che interessano la superficie liquida, infatti, si propagano verso monte nel caso di moto subcritico ma non nel caso di moto supercritico, e ciò risulta fondamentale nella scelta del punto di partenza nel calcolo del profilo idraulico.

Una delle prime operazioni da fare è quindi la determinazione del tipo di moto che si sviluppa nel tratto oggetto dell'indagine condotta con il modello.

Per definire il punto di separazione fra moto subcritico e supercritico viene utilizzato il numero adimensionale di Froude, rapporto fra le forze gravitazionali e le forze inerziali:



 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	25 di 42

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (A.1)$$

dove:

V = velocità media Q/A [m/s]

g = accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>]

D = raggio idraulico [m]

Se il numero di Froude risulta minore di 1, il moto è subcritico, se invece è superiore, il moto è supercritico; se risulta uguale a 1, il moto è critico e la situazione è di particolare instabilità.

Questa definizione del numero di Froude ipotizza che ci sia una distribuzione uniforme di velocità nella sezione. Per un canale simmetrico, rettangolare, triangolare, trapezoidale, ecc., questo presupposto si realizza, ma nel caso di un canale naturale, con sezioni irregolari e aree golenali, l'espressione data non è più valida e non può essere rigorosamente utilizzata per determinare il tipo di moto; in questo caso sarebbe più corretto utilizzare dei numeri di Froude particolari, che tengano conto delle variazioni geometriche, di velocità e di portata.

La ricerca di questi particolari numeri di Froude va effettuata caso per caso, consultando eventualmente la letteratura esistente.


Il modello, comunque, effettua al suo interno le necessarie approssimazioni e ridefinizioni del valore di questo parametro.

### Altezza critica

L'altezza critica è una caratteristica molto importante per il moto, dato che, come già accennato, rappresenta un criterio per discriminare i vari regimi di moto.

Il moto che si sviluppa con un'altezza pari, o vicina, all'altezza critica è chiamato moto critico; questa situazione è molto instabile poiché una piccola variazione di energia specifica causa grandi variazioni di livello.

L'energia specifica E di una sezione trasversale è l'energia riferita al punto più basso del tratto in esame; è quindi la somma della profondità y e del termine  $V^2/2g$ :

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	26 di 42

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (A.2)$$

La determinazione dell'altezza critica viene complicata dalla distribuzione delle velocità che ci si trova ad avere in sezioni irregolari, associate a flusso nelle golene. Il contributo cinetico nell'equazione dell'energia specifica deve quindi essere corretto tramite un moltiplicatore  $\alpha$  di Coriolis. Si ha quindi:

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (A.3)$$

In HEC-RAS, l'altezza critica relativa ad una sezione viene determinata ricercando il minimo dell'energia specifica.

La ricerca viene fatta con un procedimento iterativo partendo da un valore WS di primo tentativo al quale ne consegue un valore di energia specifica dato dalla (A.3), che verrà poi corretto fino alla determinazione del WS in grado di garantire il minimo valore di H.

HEC-RAS può calcolare l'andamento di profili subcritici e supercritici. Viene però richiesto all'utente di specificare il regime di moto all'atto del setup dell'applicazione.


Se si verifica il caso di avere la presenza dei due regimi nel tronco oggetto di studio, diventa necessario suddividere il tronco in tratti in cui si abbia presenza di un solo regime di moto. Nel punto in cui avviene il passaggio tra un regime e l'altro, infatti, HEC-RAS non effettuerà il calcolo attraverso l'altezza critica, ma assumerà al limite un'altezza pari a quella critica.

### A.3 Procedure di calcolo per simulazioni in moto permanente

#### Ricostruzione del campo di moto in una sezione trasversale

Per trovare il valore del coefficiente  $\alpha$  relativo a una sezione naturale, o comunque irregolare, è necessario conoscere come si suddivide la portata, ossia quanta fluisce nel canale propriamente detto e quanta nelle zone golenali. Viene a questo scopo utilizzata l'equazione di Manning:

$$V = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (A.4)$$

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	27 di 42

$$Q = VA = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} S_f^{1/2} \quad (A.5)$$

Ponendo quindi:

$$K = \text{trasporto} = \frac{1.486}{n} AR^{2/3} \quad (A.6)$$

si ha che:

$$Q = KS_f^{1/2} \quad (A.7)$$

che viene scritta per ognuna delle i-esime sezioni considerate.

In HEC-RAS, il raggio idraulico R di una subarea è calcolato dividendo l'area per il perimetro bagnato. Il confine d'acqua immaginario tra due subaree viene trascurato.

Tramite alcuni passaggi si trova che:

$$\alpha = \frac{(\sum A_i)^2 (\sum K_i^3 / A_i^2)}{(\sum K_i)^3} \quad (A.8)$$

#### Distribuzione delle pressioni in una sezione trasversale

Come già detto, una delle ipotesi di base nel calcolo del profilo da parte di HEC-RAS è la distribuzione idrostatica delle pressioni. Si può assumere che la pressione sia idrostatica in un fluido in movimento se le linee di corrente sono essenzialmente dritte e parallele. La maggior parte dei canali naturali con moto gradualmente vario rispetta queste condizioni, non rispettate invece nel caso di moto rapidamente vario.

#### Distribuzione delle velocità in senso trasversale alla corrente

La libreria di algoritmi di simulazione idraulica in dotazione al modello HEC-RAS include la possibilità di analizzare la distribuzione delle velocità della corrente all'interno di una stessa sezione trasversale, eliminando la limitazione della teorica del moto unidimensionale che prevede, al contrario, l'imposizione di una unica velocità media caratteristica valida per l'intera sezione di deflusso.

Rispetto ad un vero modello bidimensionale, tale l'algoritmo di calcolo utilizzato da HEC

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	001	REV. A	FOGLIO 28 di 42

RAS comporta l'accettazione di una serie di semplificazioni, tra cui:

- la quota idrometrica risulterà comunque orizzontale;
- non vengono considerati gli effetti della forza centrifuga.

Vengono invece considerati gli effetti della variazione del raggio idraulico locale, e la differente scabrezza del perimetro bagnato.

Questa tecnica consenta di ottenere, con una certa attendibilità specie nei tratti rettilinei, l'andamento della velocità al variare della posizione del punto lungo una direttrice trasversale alla corrente che deve essere intesa come velocità media sulla verticale.

### A.3 Calcolo dei profili idraulici

Il calcolo dei profili idraulici avviene in due fasi tra loro intimamente collegate: bilancio dell'energia e conseguente calcolo del profilo.


#### Bilancio dell'energia

La perdita di energia fra due sezioni trasversali, prese perpendicolarmente al flusso, è la base per il calcolo del profilo idraulico. L'energia totale, in termini di altezza, è uguale alla somma dei contributi dovuti alla quota, alla pressione e al termine cinetico. Se  $\theta$  rappresenta la pendenza del fondo si ha che:

$$H = Z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (\text{A.9})$$

Il termine  $\cos \theta$  è comunemente assunto uguale a 1 per canali naturali. Si può comprendere come comunque si compia un errore molto basso imponendo questa semplificazione considerando che per una pendenza di fondo di 1:10, molto elevata,  $\cos \theta$  è uguale a 0.99. L'errore compiuto in questo caso, definibile estremo, considerandolo uguale a 1 è del 1%, e quindi, nel complesso, trascurabile.

Con riferimento all'equazione dell'energia appena scritta, si può riscriverla nel caso sia applicata tra due sezioni:

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 29 di 42

$$Z_1 + y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (\text{A.10})$$

o in altri termini:

$$H_1 = H_2 + h_e \quad (\text{A.11})$$

L'energia totale nella sezione di monte  $H_1$  è quindi uguale all'energia della sezione di valle  $H_2$  più il termine di perdita di energia  $h_e$ . Questa equazione è usata in successione da HEC-RAS spostandosi per passi da una sezione all'altra, calcolando il profilo idraulico.

### Perdite di energia

In HEC-RAS la perdita totale di energia  $h_e$  è considerata composta da due componenti: una componente di attrito  $h_f$ , dovuta alla scabrezza delle superfici e calcolata secondo l'equazione di Manning, e una componente  $h_o$ , che rappresenta le altre perdite, soprattutto dovute a contrazioni ed espansioni.

Il programma determina se il flusso è in contrazione o espansione sottraendo il termine cinetico  $V_2/2g$  alla sezione a valle dal termine cinetico alla sezione a monte. Se la differenza risulta un numero negativo, il moto è di contrazione, se positivo è di espansione. Il programma, sulla base di questo controllo, applica un coefficiente appropriato.


Se consideriamo ora un tratto di canale, la pendenza  $S_f$  della linea dell'energia in corrispondenza a una determinata sezione può essere determinata con l'equazione di Manning, inserendo la quota del pelo libero, la portata, il coefficiente di rugosità  $n$  e la geometria della sezione. L'energia persa a causa dell'attrito tra le sezioni a monte e a valle è calcolata con il seguente integrale:

$$\int_{x_2}^{x_1} S_f dx = \bar{S}_f L \quad (\text{A.12})$$

dove  $\bar{S}_f$  è la perdita specifica per attrito e  $L$  è la lunghezza del tratto in esame.

Un'approssimazione delle perdite per attrito  $h_f$  può essere ottenuta moltiplicando il termine  $\bar{S}_f$  per la lunghezza  $L$  del tronco tra le due sezioni.



 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	30 di 42

Ci sono quattro equazioni in HEC-RAS per l'approssimazione delle perdite tra due sezioni e sono le seguenti:

$$\overline{S_f} = \left( \frac{Q_1 + Q_2}{K_1 + K_2} \right)^2 \quad \text{trasporto medio} \quad (\text{A.13})$$

$$\overline{S_f} = \frac{\sqrt{S_{f_1} + S_{f_2}}}{2} \quad \text{attrito specifico medio} \quad (\text{A.14})$$

$$\overline{S_f} = \sqrt{S_{f_1} * S_{f_2}} \quad \text{media geometrica attrito specifico} \quad (\text{A.15})$$

$$\overline{S_f} = \frac{2 S_{f_1} * S_{f_2}}{S_{f_1} + S_{f_2}} \quad \text{media armonica attrito specifico} \quad (\text{A.16})$$

se nessuna di queste viene espressamente scelta in fase di setup dell'applicazione, il modello utilizza la prima delle quattro.

#### Perdite di energia per contrazione e espansione

Le perdite di energia per contrazione e espansione della corrente vengono calcolate da HEC RAS mediante la seguente espressione:

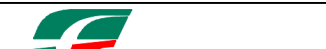
$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (\text{A.17})$$

dove C è il coefficiente di contrazione o di espansione.

Il modello considera come “contrazione” ogni situazione in cui l'energia cinetica nella sezione di valle sia superiore all'energia cinetica della sezione di monte. Viceversa, quando l'energia cinetica nella sezione di valle sia inferiore all'energia cinetica della sezione di monte, il modello considera un situazione di “espansione”.

Per valutare l'entità delle perdite di energia associate a queste situazioni, l'utente deve assegnare i valori del coefficiente C, che possono variare per ciascun tratto considerato. Valori tipici consigliati, sono C = 0.3 nel caso di espansione e C = 0.1 nel caso di contrazione.

#### Standard step method

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	31 di 42

Per illustrare il metodo “standard step method” utilizzato da HEC-RAS si possono descrivere i passi necessari per il calcolo del profilo relativo a condizioni di moto subcritico con l’equazione dell’energia.

Si suppongano quindi due sezioni di cui si conosca la quota della superficie della sezione di valle; il problema che si vuole risolvere è la conoscenza della quota corrispondente alla sezione di monte.

Si può quindi scrivere il bilancio dell’energia fra le sezioni U di monte e D di valle:

$$WS_u + \frac{a_u V_u^2}{2g} = WS_d + \frac{a_d V_d^2}{2g} + h_e \quad (A.18)$$

$$WS_u = Z_u + y_u \quad (A.19)$$

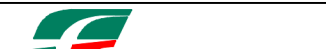
$$WS_d = Z_d + y_d \quad (A.20)$$

Assumendo che la geometria delle sezioni sia nota, i termini incogniti dell’equazione sono  $WS_u$ ,  $V_u$  e  $h_e$ .  $V_u$  è desumibile direttamente dal valore di  $WS_u$ , per cui le incognite possono essere ridotte a due.

Con due incognite è necessaria una seconda equazione, riguardante le perdite di energia ed espressa da  $h_e = h_f + h_o$ , per poter ottenere una soluzione. L’irregolarità dei canali naturali richiede una ricerca della soluzione di tipo “trail and error”, per successivi tentativi.

I passi attraverso cui avviene il calcolo sono i seguenti.

1. viene supposta una quota di pelo libero per la sezione di monte (in primo tentativo viene imposta la pendenza della linea dell’energia pari alla pendenza del tronco d’alveo, quindi  $\Delta W_s = (Q/K)^2 L$ , dove  $\Delta W_s$  rappresenta la variazione nella quota del pelo libero, Q è la portata, K il termine di trasporto e L la distanza dalla sezione a monte);
2. sulla base della quota di pelo libero assunta e della geometria della sezione, vengono determinati i termini cinetico e il trasporto totale per la sezione a monte;
3. con i valori calcolati del termine cinetico e di trasporto del passo 2, viene calcolato il valore di  $h_e$ ;

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 32 di 42

4. con il valore calcolato di  $h_e$ , viene calcolata l'altezza di pelo libero della sezione a monte utilizzando l'equazione dell'energia;
5. viene fatto un confronto fra il valore di  $h_e$  calcolato al passo 4 e il valore ipotizzato al passo 1 e se la differenza non è inferiore a una prefissata tolleranza, il ciclo riprende cambiando il valore di tentativo al passo 1.

#### **A.4 Profili idraulici in presenza di ponti**

La presenza di un ponte di attraversamento di un corso d'acqua rappresenta un punto di rapida variazione dei parametri idraulici caratteristici della corrente e di insorgenza di dissipazione localizzata di energia. In tali circostanze non è più applicabile l'equazione di Manning ed il modello ricorre ad una delle varie formulazioni presenti nella libreria di calcolo di cui dispone per una valutazione corretta del profilo che si instaura nel tratto adiacente.

##### **Delimitazione dei tratti di contrazione e di espansione**

Operazione preliminare che il modellista deve eseguire è quella della delimitazione esatta del tratto per il quale cessano di valere le condizioni di moto gradualmente variato e risulta necessaria l'applicazione di una delle formulazioni specifiche. Tale delimitazione viene eseguita imponendo la posizione planimetrica delle sezioni 1 e 4 indicate nella seguente figura.

A partire da queste il modello definisce automaticamente le sezioni 2 e 3, posizionate immediatamente a monte e a valle del ponte, normalmente in corrispondenza del piede del rilevato, come indicato nella stessa figura. Le 4 sezioni definiscono i tratti in cui avviene la contrazione e l'espansione della vena liquida a causa della presenza del ponte.

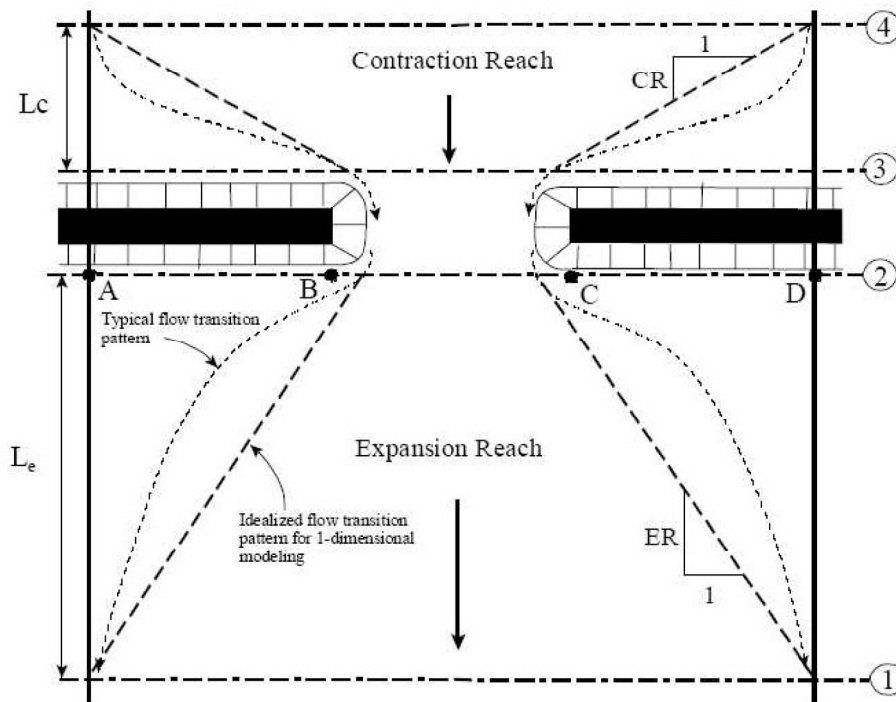



Figura A.7-2 – Posizionamento delle sezioni idrauliche per il calcolo dei ponti in Hec-Ras.

Il corretto posizionamento delle sezioni 1 e 4 è fondamentale nei casi in cui i rilevati di collegamento al ponte occupino una parte importante della zona di deflusso. La valutazione della posizione di tali sezioni è fatta sulla base dello studio effettuato dall'Hydrologic Engineering Center intitolato "Flow Transitions in Bridge Backwater Analysis" (RD-42, HEC, 1995). Lo scopo dello studio era quello di fornire delle linee guida nel calcolo con l'utilizzo di dati misurati sia con modellazioni di tipo bidimensionale, cercando, mediante regressione statistica, delle formulazioni che fornissero i 4 parametri fondamentali per la rappresentazione in un modello monodimensionale della dinamica legata alla contrazione ed espansione imposta dalla presenza del ponte, questi 4 parametri sono:

- $L_e$  lunghezza del tratto di espansione;
- $C_e$  coefficiente di espansione;
- $L_c$  lunghezza del tratto di contrazione;
- $C_c$  coefficiente di contrazione.

Per la lunghezza di espansione sono state determinate 3 formule (in unità Inglesi) in



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	34 di 42

base alla dimensione del corso d'acqua e alla portata transitante.

Per corsi d'acqua di circa 1000 ft (300 m) e portate comprese tra 5000 e 30000 cfs (150-850 m<sup>3</sup>/s) la formula proposta è:

$$L_e = -298 + 257 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 0.918 \bar{L}_{obs} + 0.00479Q$$

dove:

$L_e$  lunghezza del tratto di espansione in piedi (feet);

$F_{c2}$  numero di Froude del canale principale nella sezione 2;

$F_{c1}$  numero di Froude del canale principale nella sezione 1;

$\bar{L}_{obs}$  lunghezza media dell'ostruzione causata dai rilevati;

$Q$  portata in piedi cubi secondo (cfs).

Per corsi d'acqua più piccoli una valutazione migliore si ottiene con la seguente formula:

$$ER = \frac{L_e}{\bar{L}_{obs}} = 0.421 + 0.485 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 0.000018Q$$

Per i corsi d'acqua in cui la portata supera gli 850 m<sup>3</sup>/s è consigliata la formula:

$$ER = \frac{L_e}{\bar{L}_{obs}} = 0.489 + 0.608 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right)$$

Il coefficiente di contrazione è definito dalla formula:

$$C_e = -0.09 + 0.570 \left( \frac{D_{ob}}{D_c} \right) + 0.075 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right)$$

dove:

$D_{ob}$  tirante (calcolato come area diviso larghezza in superficie) dell'area golenale nella sezione 1;

$D_c$  tirante del canale principale nella sezione 1.

Per la valutazione delle lunghezza di contrazione sono state ottenute 2 formule, la prima valida nel campo 150-850 m<sup>3</sup>/s:

$$L_c = 263 + 38.8 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 257 \left( \frac{Q_{ob}}{Q} \right)^2 - 58.7 \left( \frac{n_{ob}}{n_c} \right)^{0.5} + 0.161 \bar{L}_{obs}$$

$Q_{ob}$  portata convogliata dalle zone golenali nella sezione 4;

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11 RI	ID0002	001 A	35 di 42

$n_{ob}$  coefficiente di Manning per le zone golenali nella sezione 4;

$n_c$  coefficiente di Manning per il canale principale nella sezione 4.

Nei casi in cui la portata non rientri nel range specificato la formula consigliata è:

$$CR = 1.4 - 0.333 \left( \frac{F_{c2}}{F_{c1}} \right) + 1.86 \left( \frac{Q_{ob}}{Q} \right)^2 - 0.19 \left( \frac{n_{ob}}{n_c} \right)^{0.5}$$

Per quanto concerne il coefficiente di contrazione la regressione statistica non ha fornito una formula valida, per cui, in assenza di dati di calibrazione, si suggerisce di assegnare il valore in base al rapporto di contrazione secondo la seguente tabella:

Rapporto di contrazione	Coefficiente di contrazione
$0.0 < b/B < 0.25$	0.3-0.5
$0.25 < b/B < 0.50$	0.1-0.3
$0.50 < b/B < 1.0$	0.1

La definizione dei tratti di contrazione e di espansione, oltre che con il corretto posizionamento delle sezioni 1 e 4, avviene con la corretta impostazione delle aree contribuenti al deflusso nelle sezioni 2 e 3. Ciò avviene mediante l'impostazione all'interno del modello delle "Ineffective flow area", le quali definiscono la parte di sezione contribuente al deflusso e quella in cui si ha solo invaso. Nel caso i tratti di contrazione ed espansione siano troppo lunghi per essere definiti in modo soddisfacente da solo 2 sezioni, si possono usare delle sezioni intermedie, avendo l'accortezza di definire le "Ineffective flow area" in modo da riprodurre la forma della vena liquida in contrazione ed espansione.

La valutazione delle lunghezze dei tratti di contrazione ed espansione ed i loro relativi coefficienti è un processo iterativo, dipendendo questi dalle caratteristiche della corrente nelle sezioni che si vogliono posizionare. Tale processo comunque converge molto rapidamente e difficilmente si effettua più di 1,2 volte il calcolo.

### **Calcolo del profilo attraverso il ponte**

Il calcolo nei tratti di contrazione (sezioni 4-3) e espansione (sezioni 2-1) avviene

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 36 di 42

mediante il bilanciamento dell'equazione dell'energia come tra 2 sezioni qualsiasi. Il calcolo tra le sezioni 2 e 3 avviene invece seguendo 4 diverse formulazioni a seconda della richiesta dell'utente:

- equazione dell'energia;
- conservazione della quantità di moto;
- equazione di Yarnell;

### Equazione dell'energia

In questo caso il programma inserisce due sezioni aggiuntive immediatamente all'interno del ponte e le tratta come due sezioni naturali, in cui l'area di deflusso è quella definita per il ponte e nel perimetro bagnato vengono aggiunti i tratti delle spalle ed eventualmente delle pile presenti.

### Conservazione della quantità di moto

L'applicazione del metodo della conservazione della quantità di moto si basa su tre passaggi fondamentali. Si considerino, oltre alle due sezioni a monte e a valle del ponte (2 e 3), due sezioni immediatamente all'interno del ponte (BU e BD).

Il primo passo consiste nel bilancio della quantità di moto tra la sezione "2" e la sezione "BD". L'equazione del bilancio può essere scritta nella seguente forma:

$$A_{BD} \overline{Y_{BD}}_v + \frac{\beta_{BD} Q_{BD}^2}{g A_{BD}} = A_2 \overline{Y}_2 - A_{PBD} \overline{Y}_{PBD} + \frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} + F_f - W_x$$

dove:

$A_2, A_{BD}$  area liquida delle sezioni 2 e v;

$A_{PBD}$  area liquida ostruita dalle pile nel lato di valle;


$\overline{Y}_2; \overline{Y}_{BD}$  distanza verticale tra la superficie dell'acqua ed il baricentro delle aree  $A_2$  e  $A_{BD}$ ;

$\overline{Y}_{PBD}$  distanza verticale tra la superficie dell'acqua ed il baricentro dell'area  $A_{PBD}$ ;

$\beta_2, \beta_{BD}$  coefficienti di Coriolis per la media della velocità;

$g$  accelerazione di gravità;

$F_f$  forza esterna dovuta all'attrito, per unità di peso dell'acqua;

	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO D011	LOTTO 00	CODIFICA R 11	DOCUMENTO RI ID0002	REV. 001 A	FOGLIO 37 di 42

$W_x$  forza peso dell'acqua nella direzione della corrente, per unità di volume.

Il secondo passo consiste nel bilancio della quantità di moto tra le sezioni "BD" e "BU", espressa come:

$$A_{BU} \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} Q_{BU}^2}{g A_{BU}} = A_{BD} \bar{Y}_{BD} + \frac{\beta_{BD} Q_{BD}^2}{g A_{BD}} + F_f - W_x$$

ed infine il terzo passo è il bilancio della quantità di moto tra le sezioni "BU" e "3", espressa come:

$$A_3 \bar{Y}_3 + \frac{\beta_3 Q_3^2}{g A_3} = A_{BU} \bar{Y}_{BU} + \frac{\beta_{BU} Q_{BU}^2}{g A_{BU}} + A_{PBU} \bar{Y}_{PBU} + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{PBU} Q_3^2}{g A_3^2} + F_f - W_x$$

dove con  $C_D$  si indica il coefficiente di trascinamento per il flusso attorno alle pile, che può variare in funzione della forma delle pile.

L'equazione della conservazione della quantità di moto richiede la conoscenza dei coefficienti di scabrezza per la stima della forza di attrito e per la stima del coefficiente di trascinamento. Questi ultimi sono usati per valutare la forza dovuta al moto dell'acqua attorno alle pile, la separazione del flusso e i fronti d'onda della scia che si genera a valle e sono riportati in apposite tabelle sperimentali in base alla forma ed alla posizione delle pile.

L'equazione è valida per deflusso con contrazione della vena liquida, ma non può essere applicata quando si abbiano le condizioni di deflusso a "bocca piena", cioè quando il pelo libero della corrente, per effetto del sopralzo dovuto all'interazione con la struttura, dovesse toccare l'intradosso del ponte.

### Equazione di Yarnell

L'equazione di Yarnell utilizzata per il calcolo del rigurgito è la seguente:

$$H_{3-2} = 2K(K + 10\omega - 0.6) \left( \alpha + 15\alpha^4 \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

dove:

$H_{3-2}$  differenza di livello tra le sezioni 3 e 2;

$K$  coefficiente di Yarnell che tiene conto della forma delle pile;

$\omega$  rapporto tra il carico cinetico e il tirante nella sezione 2;



 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002	001 A	38 di 42

$\alpha$  rapporto tra l'area occupata dalle pile e l'area non ostruita nella sezione 2;

$V_2$  velocità nella sezione 2.

L'equazione è basata su esperienze di laboratorio effettuate su circa 2600 prove nelle quali sono stati valutati diversi parametri: la forma, la larghezza, la lunghezza delle pile, l'angolo di giacitura dell'asse del ponte rispetto alla direzione della corrente e l'entità della corrente.

I limiti della formula di Yarnell sono dovuti al fatto che non vengono considerate nel calcolo né la forma del ponte, né la forma delle spalle, né la larghezza del ponte stesso. A causa di queste limitazioni la formulazione di Yarnell può essere usata solo quando le maggiori perdite di carico sono dovute alla presenza delle pile e non all'ostruzione complessiva causata dal manufatto di attraversamento (rampe di accesso, spalle e pile). Il metodo è valido solamente se il moto è lento.

La formulazione utilizzata differisce di poco da quella indicata nella Direttiva 2/99 (Par. 4.8.5), che è scritta nella forma seguente:

$$\frac{\Delta y}{y} = K_y (K_y - 0.6 + 5 F_2^2) (1 - r + 15 (1 - r)^4) F_2^2$$

dove  $(1-r) = (b_0 - b_1)/b_0$  è il grado di restringimento e  $F_2$  il numero di Froude della sezione 2.

Le due equazioni sono sostanzialmente identiche, solo che la forma qui sopra riportata privilegia il concetto di una sezione rettangolare equivalente (il rapporto di contrazione  $r$  è infatti riferito alla larghezza) per cui è possibile esplicitare il numero di Froude come elemento caratteristico del moto, mentre la forma dell'equazione presentata prima fa riferimento, più in generale, ad una sezione di forma qualsiasi (il rapporto di contrazione  $\alpha$  è infatti un rapporto di aree).

### **Tipi di profili idraulici attraverso il ponte**

La procedura di calcolo appena illustrata si applica senza limitazioni al caso in cui la corrente si mantiene sempre in condizioni subcritiche durante il passaggio della struttura. Questo tipo di profilo idraulico viene indicato dal modello come profilo di

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE					
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI ID0002	001 A	39 di 42

“classe A high flow”. In realtà il passaggio attraverso la struttura può avvenire in condizioni supercritiche o miste.

In particolare si genera un profilo di “classe B low flow” quando la corrente è costretta al passaggio attraverso una condizione critica proprio nel tratto in cui la struttura produce il restringimento. Tale circostanza può avvenire sia in condizioni di moto subcritico che supercritico. In ogni caso il modello calcola il tirante idraulico di monte mediante l'equazione della quantità di moto.

Infine si osserva un profilo di “classe C low flow” quando la corrente si mantiene sempre in condizioni di moto supercritico durante il passaggio della struttura. Il modello può utilizzare sia l'equazione dell'energia sia quella della quantità di moto.

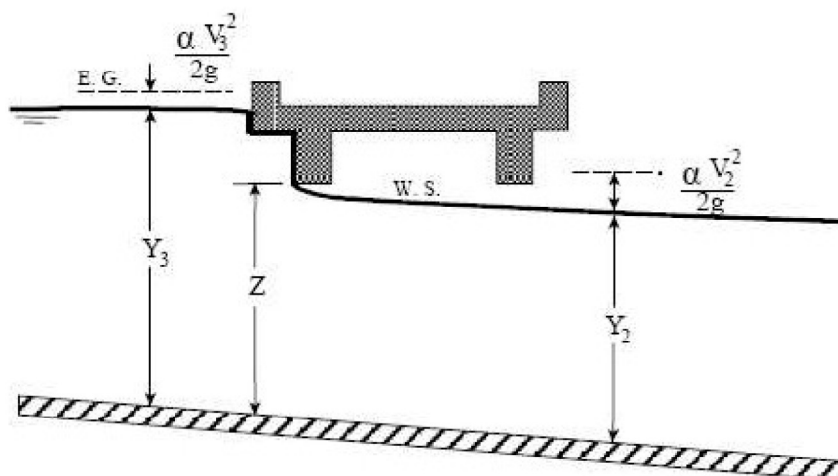
### **Calcolo del profilo in condizioni di high flow**

Le formule descritte al paragrafo precedente sono valide quando il pelo libero non viene a contatto con l'intradosso del ponte, in questo caso infatti solo l'equazione dell'energia può ancora utilizzarsi, aggiungendo al perimetro bagnato della sezione BU, ed eventualmente BD, la lunghezza di intradosso. Nel caso si abbia il raggiungimento dell'intradosso dell'impalcato il deflusso avverrà in condizioni di “pressione” e, in caso di completo sormonto dell'impalcato, alla portata transitata attraverso la struttura dovrà essere aggiunta quella defluita al di sopra dell'impalcato, valutabile in modo simile al passaggio sopra una soglia fissa. In questi casi è possibile però utilizzare le formule della foronomia, variamente sviluppate da diversi autori. Il programma HEC-RAS utilizza le formule di seguito descritte.

#### **Deflusso in pressione libero**

Il deflusso in pressione libero si sviluppa quando il pelo libero entra in contatto con l'intradosso del ponte solo nel lato di monte del ponte, mentre a valle si ha il deflusso libero. La formula utilizzata è del tipo deflusso sotto battente ed in particolare è utilizzata la formula sviluppata dalla Federal Highway Administration:

$$Q = C_D A_{BU} \sqrt{2g \left( Y_3 - \frac{Z}{2} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} \right)}$$



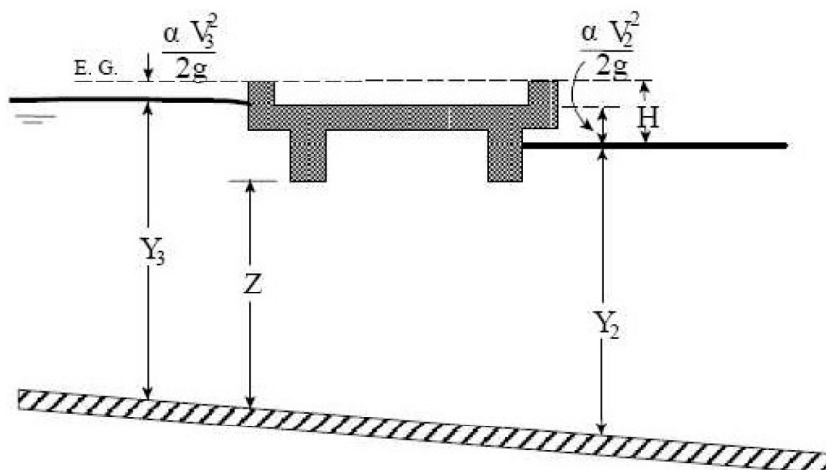
Il coefficiente di deflusso  $C_D$  può essere definito dall'utente o automaticamente "scelto" dal programma dato il rapporto  $Y_3/Z$  sulla base di dati sperimentali.

#### Deflusso in pressione rigurgitato

Il deflusso in pressione è rigurgitato quando anche a valle del ponte il pelo libero viene a contatto con l'intradosso, la capacità di deflusso diminuisce e la formula precedente non è più valida e il programma utilizza la seguente:

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

con C coefficiente di deflusso variabile tra 0.7 e 0.9.



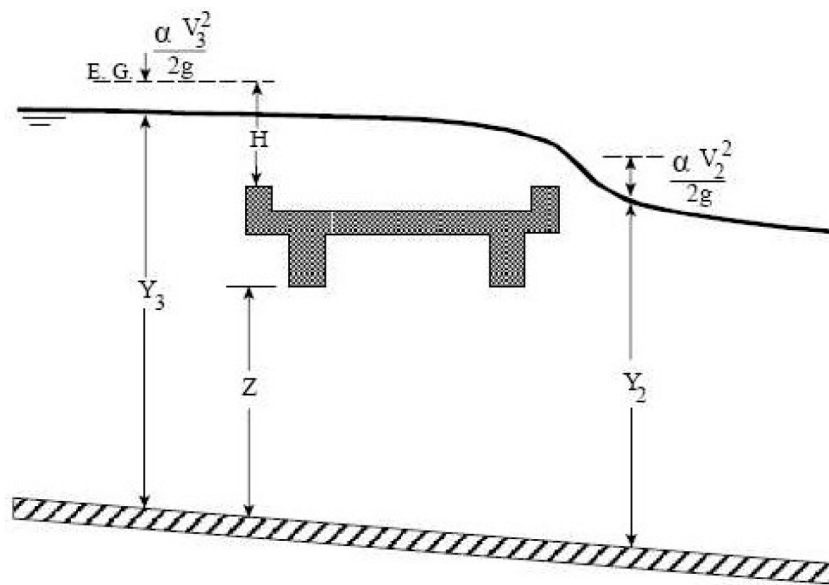
#### Deflusso a stramazzo

Quando il pelo libero supera l'estradosso del ponte si ha deflusso anche al di sopra del

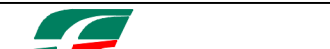
ponete, tale deflusso viene calcolato con la tipica formula degli stramazzi:

$$Q = CLH^{3/2}$$

con C coefficiente di deflusso compreso tra 1.38 e 1.71.





 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	PROGETTO PRELIMINARE L.O. N.443/01 NUOVA LINEA TORINO LIONE TRATTA NAZIONALE						
<b>RELAZIONE IDRAULICA T. SANGONE</b>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA		DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	D011	00	R 11	RI	ID0002 001	A	42 di 42

## **APPENDICE B – RISULTATI MODELLISTICI: TORRENTE SANGONE**

HEC-RAS Plan: SDF River: Torrente Reach: Sangone

Reach	River Sta	Profile	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	Hydr Depth (m)	Vel Total (m/s)	Froude # XS
Sangone	5	Tr 50	265.68	268.77	269.30	1.88	3.24	0.75
Sangone	5	Tr 200	265.68	269.04	269.61	2.03	3.35	0.75
Sangone	5	Tr 500	265.68	269.20	269.79	2.12	3.41	0.75
Sangone	4	Tr 50	260.20	262.76	263.18	1.67	2.87	0.71
Sangone	4	Tr 200	260.20	263.01	263.46	1.88	2.96	0.69
Sangone	4	Tr 500	260.20	263.15	263.62	2.00	3.02	0.68
Sangone	3	Tr 50	256.60	259.23	259.51	1.90	2.32	0.54
Sangone	3	Tr 200	256.60	259.38	259.72	2.02	2.55	0.57
Sangone	3	Tr 500	256.60	259.47	259.84	2.09	2.69	0.59
Sangone	2	Tr 50	251.41	255.61	255.71	3.05	1.35	0.25
Sangone	2	Tr 200	251.41	256.15	256.24	3.48	1.36	0.23
Sangone	2	Tr 500	251.41	256.45	256.55	3.73	1.37	0.23
Sangone	1	Tr 50	248.18	254.13	254.64	4.01	3.14	0.50
Sangone	1	Tr 200	248.18	254.70	255.24	4.25	3.26	0.51
Sangone	1	Tr 500	248.18	255.00	255.57	4.31	3.33	0.51

