

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE  
DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01**

CUP: J31J05000010001

**U.O. INFRASTRUTTURE NORD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA  
TRATTA RHO - GALLARATE**

ATTRAVERSAMENTO FIUME OLONA – Studio Idraulico

Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona

SCALA

-

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

**MDL1 30 D 26 RI ID0002 001 A**

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato/ Data
A	Emissioni esecutiva	M. Coccato	Ottobre 2017	M. Ventura	Ottobre 2017	S. Borelli	Ottobre 2017	F. Sacchi Ottobre 2017

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD  
Ufficio Progetti Sacchi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
F. Sacchi  
27/10/2017

File: MDL130D26RIID0002001A.doc

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 2 di 88

## **SOMMARIO**

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>4</b>
1.1	SCOPO DEL DOCUMENTO .....	5
<b>2</b>	<b>IDROGRAFIA DEL TERRITORIO.....</b>	<b>7</b>
2.1	ATTRAVERSAMENTO DEL FIUME OLONA .....	11
<b>3</b>	<b>NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>14</b>
3.1	INQUADRAMENTO NORMATIVO IN MATERIA IDRAULICA.....	15
3.1.1	<i>Piano di bacino e piano stralcio per l’assetto idrogeologico.....</i>	<i>17</i>
3.1.2	<i>Piano di gestione del rischio di alluvioni PGRA.....</i>	<i>27</i>
<b>4</b>	<b>STUDI PREGRESSI .....</b>	<b>30</b>
4.1	STUDIO DI FATTIBILITÀ DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA DEI CORSI D’ACQUA NATURALI E ARTIFICIALI ALL’INTERNO DELL’AMBITO IDROGRAFICO DI PIANURA LAMBRO – OLONA (SDF).....	31
4.2	ANALISI DELLE INTERFERENZE DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO INADEGUATI AL DEFLUSSO DELLE PIENA DI RIFERIMENTO .....	34
4.3	EVOLUZIONI PROGETTUALI DELL’ATTRAVERSAMENTO SUL FIUME OLONA.....	35
<b>5</b>	<b>DATI DI BASE .....</b>	<b>39</b>
5.1	DATI TOPOGRAFICI .....	39
5.2	CONDIZIONI AL CONTORNO.....	40
5.3	COEFFICIENTI DI SCABREZZA .....	42
<b>6</b>	<b>VERIFICHE IDRAULICHE.....</b>	<b>43</b>
6.1	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONODIMENSIONALE .....	43
6.1.1	<i>Condizioni ante operam.....</i>	<i>44</i>

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE												
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PROGETTO</th> <th>LOTTO</th> <th>CODIFICA</th> <th>DOCUMENTO</th> <th>REV.</th> <th>FOGLIO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MDL1</td> <td>30</td> <td>D 26</td> <td>RI ID0002 001</td> <td>A</td> <td>3 di 88</td> </tr> </tbody> </table>	PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO	MDL1	30	D 26	RI ID0002 001	A	3 di 88
PROGETTO	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO								
MDL1	30	D 26	RI ID0002 001	A	3 di 88								

6.1.2	<i>Condizioni post operam</i> .....	45
6.1.3	<i>Risultati delle simulazioni</i> .....	47
6.2	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONO-BIDIMENSIONALE .....	49
6.2.1	<i>Condizioni ante-operam</i> .....	49
6.2.2	<i>Condizioni post-operam</i> .....	51
6.2.3	<i>Risultati ottenuti</i> .....	53
6.3	VERIFICA DEL FRANCO .....	58
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>61</b>

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 4 di 88	

## 1 PREMESSA

Il progetto di potenziamento riguarda la tratta di linea compresa tra la stazione di Rho e la radice lato Gallarate della stazione di Parabiago, nonché un intervento localizzato nei pressi della stazione di Busto Arsizio, per la realizzazione del “raccordo Y”.

La tratta in esame è ubicata a nord-ovest di Milano ed interessa una fascia di territorio compresa nei comuni di Rho, Pregnana Milanese, Vanzago, Pogliano Milanese, Nerviano e Parabiago in provincia di Milano, alla quale si aggiunge una porzione di territorio dei comuni di Castellanza e Busto Arsizio in provincia di Varese.

Gli interventi si sviluppano per un'estensione di circa 15 km e sono sinteticamente riassumibili in:

### PRG di Rho

- Realizzazione bretella di collegamento tra il binario pari della linea “Milano P.ta Garibaldi-Novara” ed il binario pari linea “Milano-Varese” nel tratto Rho – Fiera Milano;
- PRG della Stazione di Rho con collegamento fra questa e le linee Milano-Torino e Rho-Arona

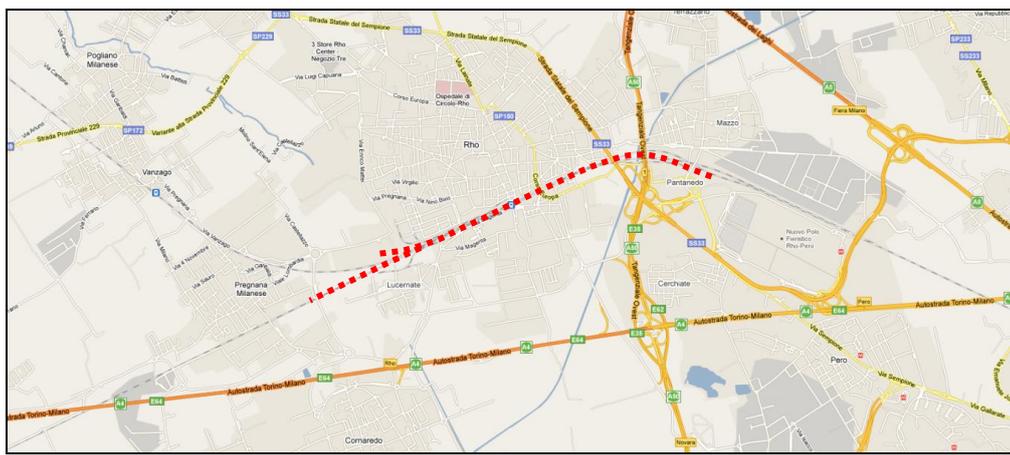


Figura 1.1 – Corografia dell'intervento (Lotto 1)

### Tratta Rho-Parabiago e Raccordo Y

- Realizzazione del quadruplicamento della linea tra Rho e Parabiago;
- Realizzazione del raccordo Y di collegamento tra la linea F.S. e la linea Ferrovie Nord Milano (F.N.M.) in prossimità della stazione di Busto Arsizio.

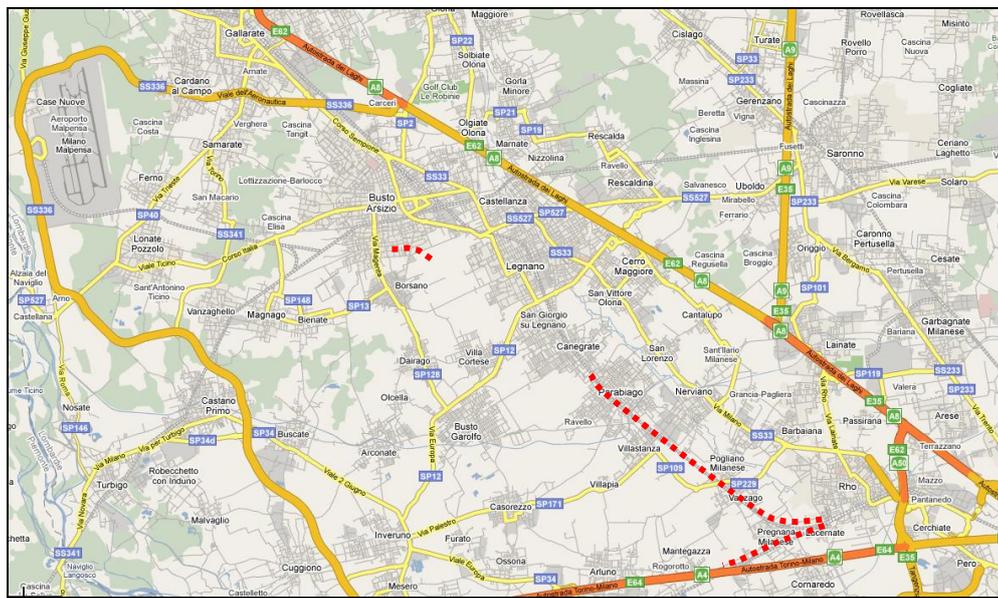


Figura 1.2 – Corografia dell'intervento (Lotto 2)

Le interferenze idrauliche principali sono quelle dovute all'attraversamento e/o all'affiancamento dei seguenti corsi d'acqua:

- ✓ Fiume Olona (costruzione di un viadotto);
- ✓ Canale Villoresi (adeguamento in larghezza di un ponte esistente);
- ✓ Derivatore di Parabiago, detto anche Canale secondario Villoresi.

## 1.1 SCOPO DEL DOCUMENTO

Il progetto prevede la costruzione di nuovi binari, in affiancamento a quelli esistenti, e richiede l'ampliamento della larghezza dell'attuale sede ferroviaria. Di conseguenza, vi è la necessità di adeguare le strutture di attraversamento dei corsi d'acqua incontrati lungo il percorso e delle eventuali opere idrauliche che, per loro posizione, risultano incompatibili con il futuro assetto della linea ferroviaria.

Le interferenze idrauliche principali incontrate nella realizzazione delle opere in progetto, sono quelle dovute agli attraversamenti del fiume Olona e del canale Villoresi (sui quali è previsto l'adeguamento delle strutture di attraversamento esistenti) e dall'affiancamento del derivatore di Parabiago, detto anche Canale secondario Villoresi, che prevede lo spostamento della sezione di deflusso esistente, necessario per far posto alla nuova piattaforma ferroviaria.

Di questi corsi d'acqua, solamente il primo rappresenta un corso d'acqua naturale,

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 6 di 88

con regime idrologico dipendente dalle caratteristiche morfologiche e delle condizioni meteorologiche del bacino idrografico, mentre gli altri due costituiscono collettori artificiali utilizzati a scopi irrigui. Il loro regime idrologico dipende pertanto dalle modalità di gestione dei manufatti di regolazione idraulica presenti lungo il tracciato.

La presente relazione idraulica è parte integrante degli studi volti al dimensionamento del nuovo ponte ferroviario sul Fiume Olona, nell'ambito del Potenziamento della linea Rho – Alona.

Lo studio idraulico si è basato sull'utilizzo di software specifici: sono stati implementati un modello monodimensionale (HEC-RAS) ed un modello 1D-2D (InfoWorks ICM), utilizzando le informazioni plano-altimetriche aggiornate sia del corso d'acqua (sezioni e manufatti del rilievo topografico 2017) che delle aree perfluviali (rilievo LiDAR 2012).

Oltre al dimensionamento delle opere, sono state analizzate le norme di attuazione e le direttive tecniche allegate al Piano stralcio di Assetto Idrogeologico del fiume Po, e la Direttiva sulle Alluvioni del Distretto Idrografico Padano al fine di valutare la compatibilità idraulica del progetto.

Gli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio sono riportati in Tabella:

DESCRIZIONE ELABORATO	CODIFICA ELABORATO																			
	a	a	a	b	b	c	d	d	e	e	f	f	h	h	j	j	g	i	i	i
Relazione di compatibilità idraulica - Fiume Olona	M	D	L	1	3	0	D	2	6	R	1	I	D	0	0	0	2	0	0	1
Planimetria con sezioni di studio del corso d'acqua Tav. 1/2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	7	I	D	0	0	0	2	0	0	1
Planimetria con sezioni di studio del corso d'acqua Tav. 2/2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	7	I	D	0	0	0	2	0	0	2
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 50 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	3
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 50 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	4
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 100 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	5
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 100 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	6
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 100 anni - interventi di progetto	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	7
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 200 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	8
Aree di esondazione con indicazione dei tiranti idrici per Tr 200 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	1	9
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 50 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	0
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 50 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	1
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 100 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	2
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 100 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	3
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 100 anni - interventi di progetto	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	4
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 200 anni - ante operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	5
Aree di esondazione con indicazione delle velocità per Tr 200 anni - post operam	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	6	I	D	0	0	0	2	0	2	6
Planimetria e dettagli costruttivi sistemazione idraulica Tav. 1/2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	1
Planimetria e dettagli costruttivi sistemazione idraulica Tav. 2/2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	P	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	2
Profilo idraulico ante e post operam per Tr 50 anni	M	D	L	1	3	0	D	2	6	F	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	6
Profilo idraulico ante e post operam per Tr 100 anni	M	D	L	1	3	0	D	2	6	F	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	7
Profilo idraulico ante e post operam per Tr 200 anni	M	D	L	1	3	0	D	2	6	F	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	8
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 50 anni - Tav. 1 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	1
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 50 anni - Tav. 2 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	2
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 100 anni - Tav. 1 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	3
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 100 anni - Tav. 2 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	4
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 200 anni - Tav. 1 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	5
Sezioni trasversali significative con livelli ante-operam e post-operam Tr 200 anni - Tav. 2 di 2	M	D	L	1	3	0	D	2	6	W	Z	I	D	0	0	0	2	0	0	6

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 7 di 88

## 2 IDROGRAFIA DEL TERRITORIO

Il territorio interessato dal progetto rientra interamente all'interno del bacino idrografico del fiume Olona che si estende nel territorio delle province di Varese, Milano e di Como, interessando marginalmente anche il territorio svizzero.

Il bacino Lambro-Olona (in rosso nella Figura 3.1) è compreso interamente all'interno del Distretto Idrografico Padano, le competenze in materia di pianificazione idraulica sono invece demandate all'Autorità di Bacino del fiume Po.

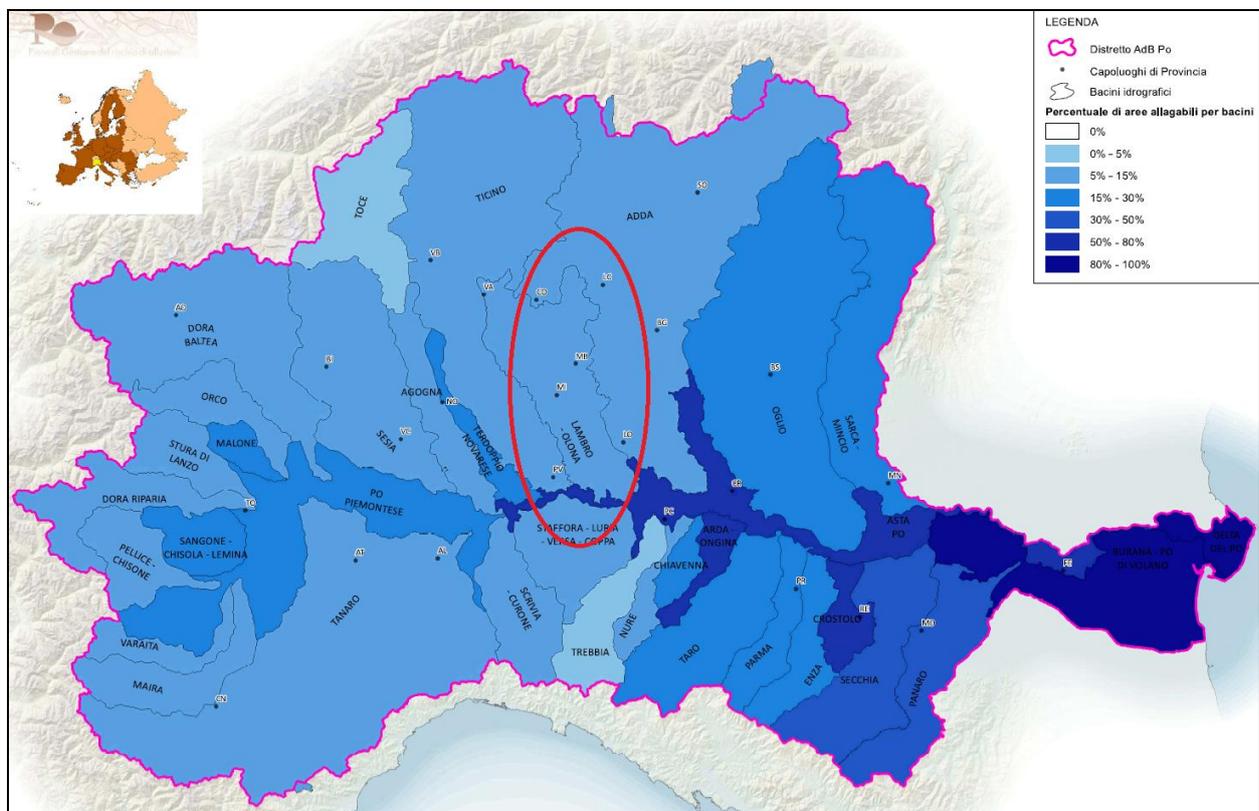


Figura 3.1 – Percentuale di aree allagabili per bacini

L'origine del corso d'acqua trova ubicazione presso le pendici dei monti a Nord di Varese ad una quota di circa 1000 m s.m.m. e, dopo un tragitto di circa 60 km, entra nell'abitato di Milano da cui esce con il nome di Lambro Meridionale. Lungo il suo percorso, lambisce la città di Varese, riceve, in sinistra, il contributo del Torrente Bevera e, in destra, le acque del Rio Velone; poco più a sud, in località Valle Folla, raccoglie le acque del Rio Ranza, il cui corso ha origine dalle pendici del Monte San Giorgio, in territorio svizzero.

Il bacino dell'Olona, chiuso in corrispondenza dell'immissione nel tombino appena a

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 8 di 88

monte di Milano ha un'estensione complessiva di circa 475 km<sup>2</sup>, che include sia il bacino del torrente Bozzente avente un'estensione di 79 km<sup>2</sup>, sia il bacino del torrente Lura con superficie di 150 km<sup>2</sup>.

I caratteri morfologici del bacino idrografico si differenziano in maniera netta distinguendo una parte montana ed una pianeggiante. La prima si chiude in corrispondenza di Ponte Gurone, in comune di Malnate, e presenta una superficie di 95 km<sup>2</sup>. La seconda si estende dalla sezione di Ponte Gurone fino alla chiusura. La parte montana del bacino ha una forma a Y, dove il ramo occidentale è rappresentato dal bacino dell'Olona vero e proprio mentre la parte orientale è costituita dal territorio tributario del Torrente Bevera, del Torrente Clivio e del Rio Ranza. Al ramo occidentale, il più urbanizzato dei due, appartengono gli abitati di Varese e di Induno Olona, mentre il ramo orientale, salvo alcuni centri abitati di modeste dimensioni, è per la maggior parte costituito da terreno boschivo e agricolo.

A valle di Ponte Gurone, il bacino assume una forma molto stretta e allungata in direzione Nord-Sud, alternando zone densamente urbanizzate a zone agricole e/o boschive.

Fino all'attraversamento con l'autostrada Milano-Varese l'alveo percorre una valle nella quale i centri abitati sono situati in posizione sopraelevata rispetto al corso del fiume. Oltrepassata l'autostrada il fiume Olona entra nella zona maggiormente urbanizzata attraversando i comuni di Castellanza e Legnano all'interno dei quali l'alveo risulta addirittura tombinato.

Il Canale Scolmatore di Nord Ovest (CSNO) riveste notevole importanza strategica in termini di sviluppo e di portate di piena per lo studio completo del fiume Olona, fu realizzato proprio per alleggerire i carichi idraulici sul reticolo idrografico che entra in Milano, all'inizio degli anni '80. Attualmente scolma i contributi di piena a Nord di Milano, intercettando i corsi d'acqua a partire dal Fiume Seveso, per sversarli nel Ticino all'altezza di Abbiategrasso. Lungo il percorso intercetta le portate eccedenti dell'Olona, derivate alle prese denominate "Presa Olona 1" e "Presa Olona 2"; le portate provenienti da quest'ultima sversano nel canale scolmatore al nodo di Cornaredo, da dove parte il Deviatore Olona, realizzato recentemente per convogliare le portate in

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 9 di 88

eccesso dell'Olona, che non possono essere scaricate nel CSNO. Il Deviatore aggira a ovest la città e si collega, presso Gratosoglio, al Lambro meridionale.

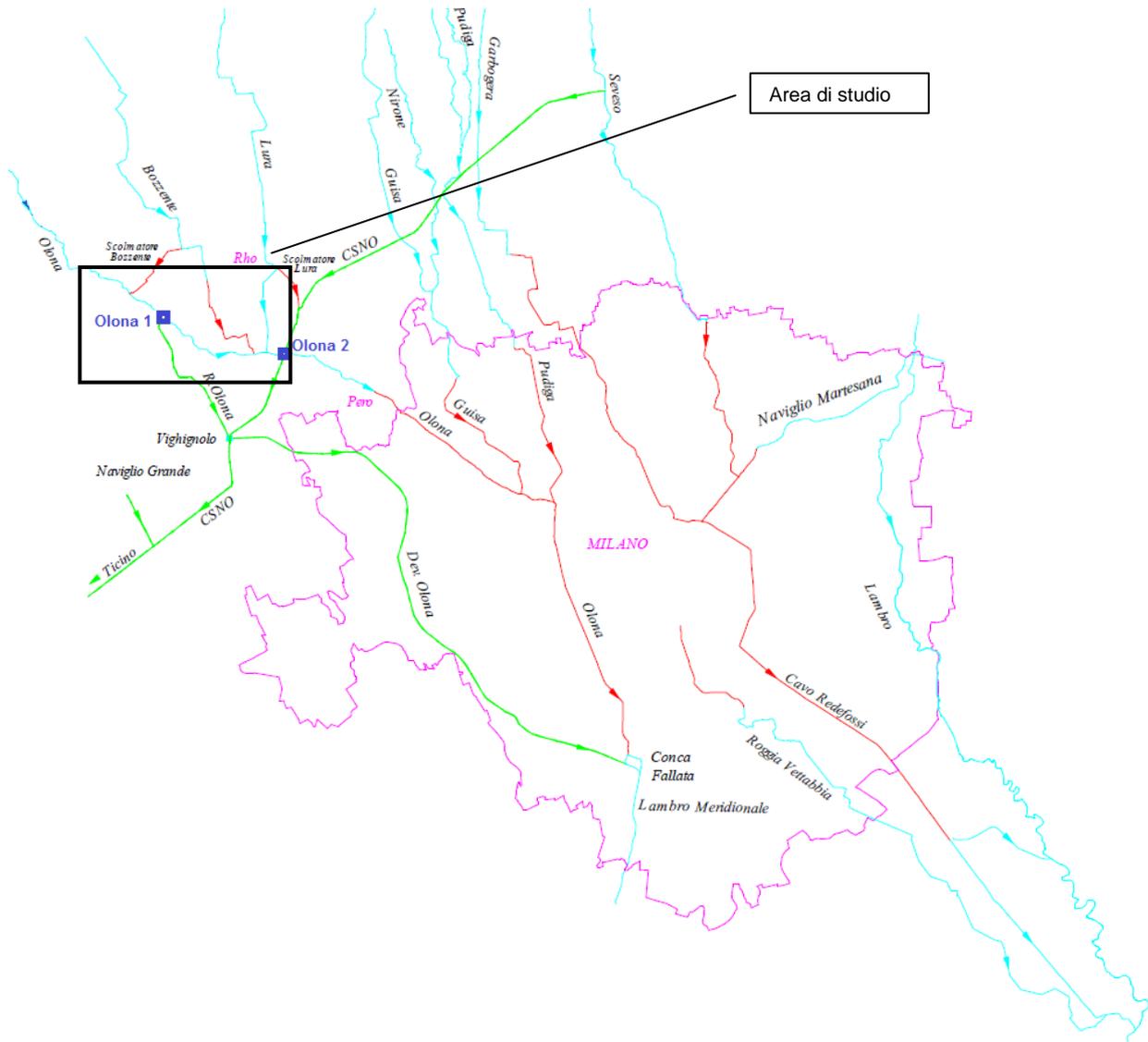


Figura 3.2 – Carta di dettaglio del reticolo idrografico focalizzata sul centro di Milano. Sono indicati in verde il Canale Scolmatore di Nord – Ovest e il Deviatore Olona, in rosso i tratti tominati (fonte: Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 IV A. Area a rischio significativo di alluvione ARS Distrettuali 2. Schede monografiche Città di Milano)

In dettaglio dopo l'abitato di Legnano, il fiume attraversa nuovamente aree agricole alternate ad aree urbane fino al confine del territorio del Comune di Rho, in corrispondenza del quale è posta l'opera di scolmo delle piene denominata "Preso Olona 1", progettata per deviare verso il canale scolmatore di Nord-Ovest una portata

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 10 di 88

pari a 25 m<sup>3</sup>/s mediante il Ramo Olona. A monte della “Presa Olona 1” viene immessa la portata di scolmo delle piene del Bozzente (circa 13 m<sup>3</sup>/s) mediante uno scolmatore tombinato che devia le portate del Bozzente stesso a nord dell’abitato di Rho, in località Biringhello. La seconda presa dell’Olona, denominata “Presa Olona 2”, a sud dell’abitato di Rho, è stata dimensionata per poter scaricare direttamente nel CSNO (Canale Scolmatore di Nord Ovest) sino a 15 m<sup>3</sup>/s.

Tra le due prese vi sono le confluenze di Bozzente e Lura, i cui bacini idrografici delimitano ad est il bacino dell’Olona: il primo immette la portata di magra (3 m<sup>3</sup>/s) e il secondo circa 18 m<sup>3</sup>/s. A valle della “Presa Olona 2” il fiume Olona sovrappassa il CSNO con un ponte canale e percorrendo un breve tratto (circa 3 km) sino a raggiungere l’abitato di Pero, da cui prosegue completamente tombinato, fino all’attraversamento del Naviglio Grande oltre il quale continua a cielo aperto con il nome di Lambro Meridionale. Appena prima di sottopassare il Naviglio Pavese (nodo di Conca Fallata) si ricongiunge con il Deviatore Olona (che prende parte delle acque del C.S.N.O.). La massima portata compatibile con le canalizzazioni sotterranee risulta essere di 50÷54 m<sup>3</sup>/s.

A valle dell’imbocco della tombinatura di Pero, si immette lo scarico del sistema fognante del bacino del fontanile Cagnola (comprendente il polo industriale di Arese, Mazzo di Rho, nuovo polo fieristico di Pero). Più a valle, l’Olona riceve gli apporti della Roggia Merlata (Guisa + Nirone, dopo gli scolmi in CSNO) e del Torrente Pudiga oltre a drenaggi minori della rete fognaria urbana.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 11 di 88

## 2.1 ATTRAVERSAMENTO DEL FIUME OLONA

Il fiume Olona attraversa la linea ferroviaria in prossimità della stazione di Rho.



*Figura 2.3 – Foto attraversamento ferroviario attuale (Google Earth)*

L'attraversamento rappresenta uno dei punti critici dal punto di vista della sicurezza idraulica che si incontrano lungo il fiume Olona. La sezione utile al deflusso è alquanto esigua rispetto alle portate di piena e la quota di intradosso del ponte non presenta elevati franchi di sicurezza nemmeno nelle condizioni idrologiche ordinarie.



*Figura 2.4 – Foto attraversamento ferroviario esistente sul Fiume Olona*

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

Il ponte è caratterizzato da una struttura ad arco con quota di intradosso variabile tra il paramento di monte e quello di valle.

Poco a monte dell'attraversamento l'alveo dell'Olona (vedi Figura 2.3) presenta, sulla sponda sinistra, una diramazione costituita da un piccolo canale secondario, anch'esso destinato a sottopassare la linea ferroviaria per immettersi, subito a valle di essa, nuovamente nel fiume principale. Tale diramazione appare perlopiù ostruita.



*Figura 2.5 – Foto attraversamento canale secondario esistente sul Fiume Olona*

Poco a valle dell'attraversamento, e precisamente subito dopo il suo ingresso nel territorio comunale di Pero, il fiume Olona si immette entro una tombinatura di molti chilometri, per riemergere solamente a valle di Milano. Tale tombinatura è un'altra delle singolarità presenti lungo il corso d'acqua e, come per il ponte ferroviario esistente, risulta dimensionata per una portata diversa e di molto inferiore a quella idrologica che si avrebbe nella sezione di chiusura del bacino. Naturalmente ogni singolarità produce effetti differenti, infatti se il ponte ferroviario risulta uno dei punti più critici per la sicurezza idraulica questo non è vero per la tombinatura, in cui, invece, le condizioni al contorno sono tali da garantire il corretto funzionamento dell'opera.

Il nuovo ponte in progetto, necessario per la realizzazione di un nuovo Singolo

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 13 di 88

binario, è disposto immediatamente a monte dell'attuale attraversamento ferroviario.

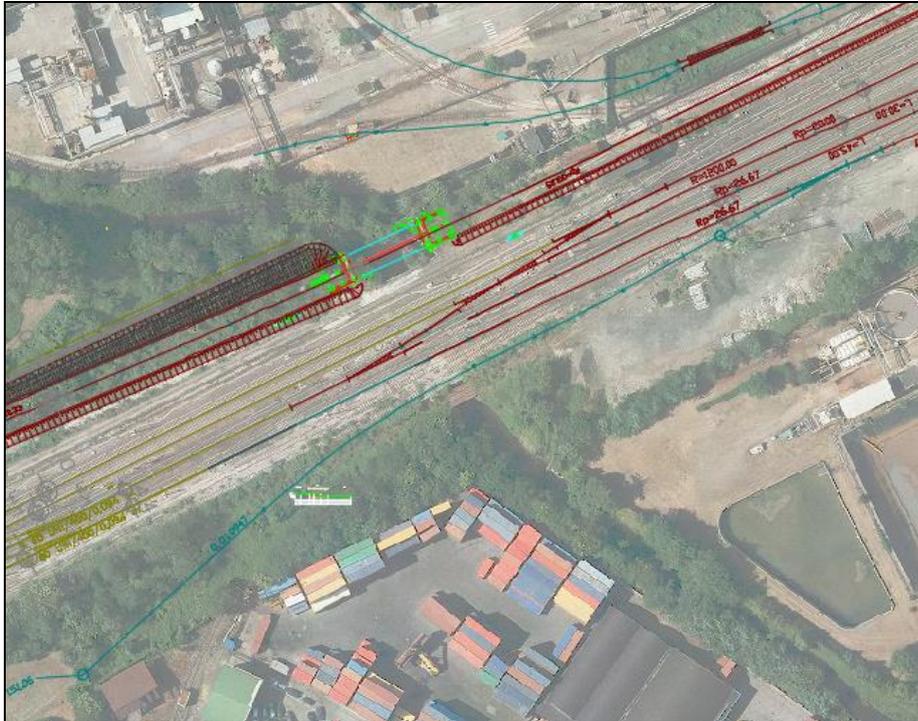


Figura 2.6 – Planimetria nuovo attraversamento ferroviario sul Fiume Olona

La distanza tra l'asse del binario del nuovo ponte in progetto e l'ingombro dell'opera esistente è di 8,75 m.

Data la particolare posizione nel contesto urbano, le problematiche del corso d'acqua in termini di esondazioni e la necessità di limitare l'incremento di quota del piano ferro, al fine di rispettare i limiti di normativa definiti dal DM 2008 in merito al franco idraulico, si è scelto di optare per un ponte a via inferiore con travi portanti di bordo estradossate che consente di limitare lo spessore dell'impalcato ad 1,36 m. Tale struttura permette di scavalcare una luce netta tra gli allineamenti degli appoggi di 25 m.

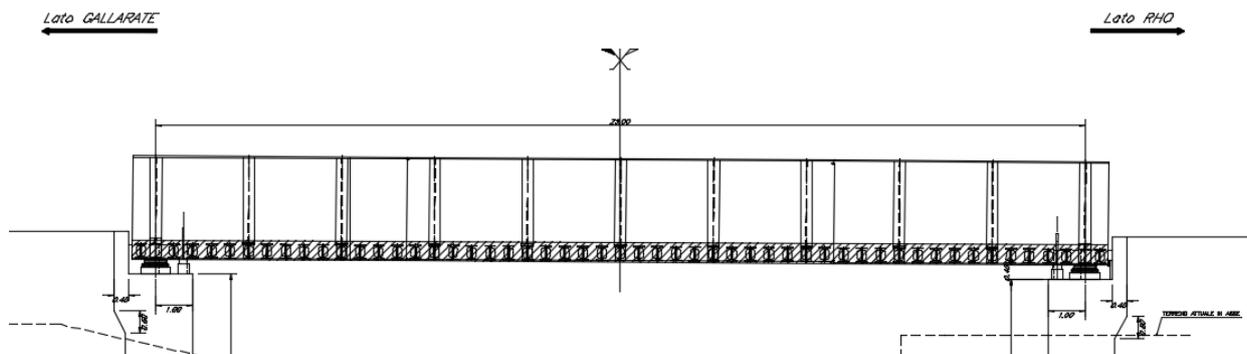


Figura 2.7 – Sezione impalcato nuovo ponte

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 14 di 88	

### 3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il progetto è stato redatto nel rispetto delle seguenti norme:

- Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE;
- D.lgs n. 152/2006 – T.U. dell’ambiente e aggiornamenti;
- Direttiva Alluvioni 2007/60/CE;
- R.D. 25/07/1904, N. 523 "Testo unico delle disposizioni di legge intorno alle opere idrauliche delle diverse categorie";
- "Manuale di Progettazione delle Opere Civili" della Rete Ferroviaria Italiana (RFI) aggiornato;
- PAI - 7. Norme di Attuazione - Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica - Allegato 3 Distribuzione spaziale delle precipitazioni intense. Parametri delle linee segnalatrici di probabilità pluviometrica per tempi di ritorno di 20, 100, 200 e 500 anni;
- Piano stralcio delle fasce fluviali – Autorità di bacino del Po – Dlgs. Del 24 luglio 1998;
- PdG Po – Piano di Gestione del fiume Po approvato il 3/03/2016 (DPCM 27 ottobre 2016).

Il progetto in essere considera inoltre:

- “Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro-Olona” dell’Autorità di Bacino del fiume Po;
- “Analisi delle interferenze dei manufatti di attraversamento inadeguati al deflusso delle piena di riferimento (ai sensi degli artt. 19 e 38 delle Norme di attuazione del PAI)” della segreteria tecnica dell’Autorità di bacino del Po.

Il rispetto del DM 14 gennaio 2008 riguarda principalmente gli aspetti relativi alla Compatibilità Idraulica per le Opere d’Arte di linea maggiori intese come Ponti e Viadotti, in particolare:

- cfr. §§ 5.2.1.2 e 5.1.2.4 del DM Infrastrutture 14 Gennaio 2008

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 15 di 88

**Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona**

*“Quando il ponte interessa un corso d’acqua naturale o artificiale, il progetto dovrà essere corredato da una relazione idrologica e da una relazione idraulica riguardante le scelte progettuali, la costruzione e l’esercizio del ponte.*

*L’ampiezza e l’approfondimento della relazione e delle indagini che ne costituiscono la base saranno commisurati all’importanza del problema.*

*Di norma il manufatto non dovrà interessare con spalle, pile e rilevati il corso d’acqua attivo e, se arginato, i corpi arginali. Qualora eccezionalmente fosse necessario realizzare pile in alveo, la luce minima tra pile contigue, misurata ortogonalmente al filone principale della corrente, non dovrà essere inferiore a 40 metri. Soluzioni con luci inferiori potranno essere autorizzate dall’Autorità competente, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.*

*Nel caso di pile e/o spalle in alveo cura particolare è da dedicare al problema delle escavazioni dell’alveo e alla protezione delle fondazioni delle pile e delle spalle.*

*La quota idrometrica ed il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto riferita ad un periodo di ritorno non inferiore a 200 anni.*

*Il franco di sottotrave e la distanza tra il fondo alveo e la quota di sottotrave dovranno essere assunte tenendo conto del trasporto solido di fondo e del trasporto di materiale galleggiante.*

*Il franco idraulico necessario non può essere ottenuto con il sollevamento del ponte durante la piena...”*

- cfr. §§ C5.2.1.2 e C5.1.2.4 della Circolare 02 Febbraio 2009 n°617/C.S.LL.PP

*“ ...A titolo di indicazione, in aggiunta alla prescrizione di un franco normale minimo di 1,50÷2,00 m, è da raccomandare che il dislivello tra fondo e sottotrave sia non inferiore a 6÷7 m quando si possa temere il transito d'alberi d'alto fusto, con l'avvertenza di prevedere valori maggiori per ponti con luci inferiori a 40 m o per ponti posti su torrenti esposti a sovralti d'alveo per deposito di materiali lapidei provenienti da monte o dai versanti...”*

### **3.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO IN MATERIA IDRAULICA**

Con le disposizioni del Testo Unico in materia ambientale (Decreto legislativo n. 152/2006) l'intero territorio italiano è stato ripartito complessivamente in 8 distretti idrografici in ognuno dei quali è istituita l’Autorità di bacino distrettuale, definita giuridicamente come ente pubblico non economico.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 16 di 88



Figura 3.1 - Suddivisione territoriale in Distretti idrografici

Il sistema idrografico naturale interferente con le opere di adeguamento della tratta ferroviaria Rho - Gallarate, è quello afferente il fiume Olona, a sua volta appartenente al più vasto bacino idrografico del fiume Po, al quale contribuisce con una superficie drenata di 911 km<sup>2</sup>, dei quali 902 km<sup>2</sup> in territorio italiano ed i rimanenti 9 km<sup>2</sup> in territorio svizzero (Figura 4.1) e ricade completamente nell'area di intervento del Distretto idrografico Padano.

Nell'immagine a seguire i principali bacini idrografici gestiti, fino a febbraio 2017, dall'Autorità di Bacino del fiume Po (in rosso il bacino idrografico di interesse).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 17 di 88



Figura 3.2 - Principali sottobacini idrografici del fiume Po.

Nel presente capitolo vengono analizzati e descritti 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.

### 3.1.1 Piano di bacino e piano stralcio per l'assetto idrogeologico

Il Piano di Bacino, i cui contenuti sono definiti dalla legge 183/89, si propone come 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,

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 18 di 88	

strutturali e non, e necessità di una base conoscitiva e di studi settoriali molto ampia.

Il “Piano stralcio per l’Assetto Idrogeologico, PAI”, redatto dall’Autorità di Bacino e approvato con Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 18 in data 26 aprile 2001, ha come obiettivo prioritario la riduzione del rischio idrogeologico entro valori compatibili con gli usi del suolo in atto, in modo tale da salvaguardare l’incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni ai beni esposti. Esso 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.

Per quanto riguarda il fiume Olona non esiste una perimetrazione delle fasce fluviali inserita nel PSFF e la delimitazione alla quale fare riferimento è quella riportata nel PAI.

In applicazione del metodo di delimitazione, approvato dal Comitato Istituzionale dell’Autorità di bacino con deliberazione n. 19/1995, il PSFF ha individuato tre fasce fluviali definite come segue:

- **Fascia A** (Fascia di deflusso della piena): è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 19 di 88

- costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena.
- Fascia B** (Fascia di esondazione): esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata.
  - Fascia C** (Area di inondazione per piena catastrofica): è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.

Uno schema esplicativo della definizione delle Fasce fluviali è riportato in Figura 3.3. Le fasce fluviali sono state delimitate in funzione dei principali elementi dell'alveo che ne determinano la connotazione fisica: caratteristiche geomorfologiche, dinamica evolutiva, opere idrauliche, caratteristiche naturali e ambientali.

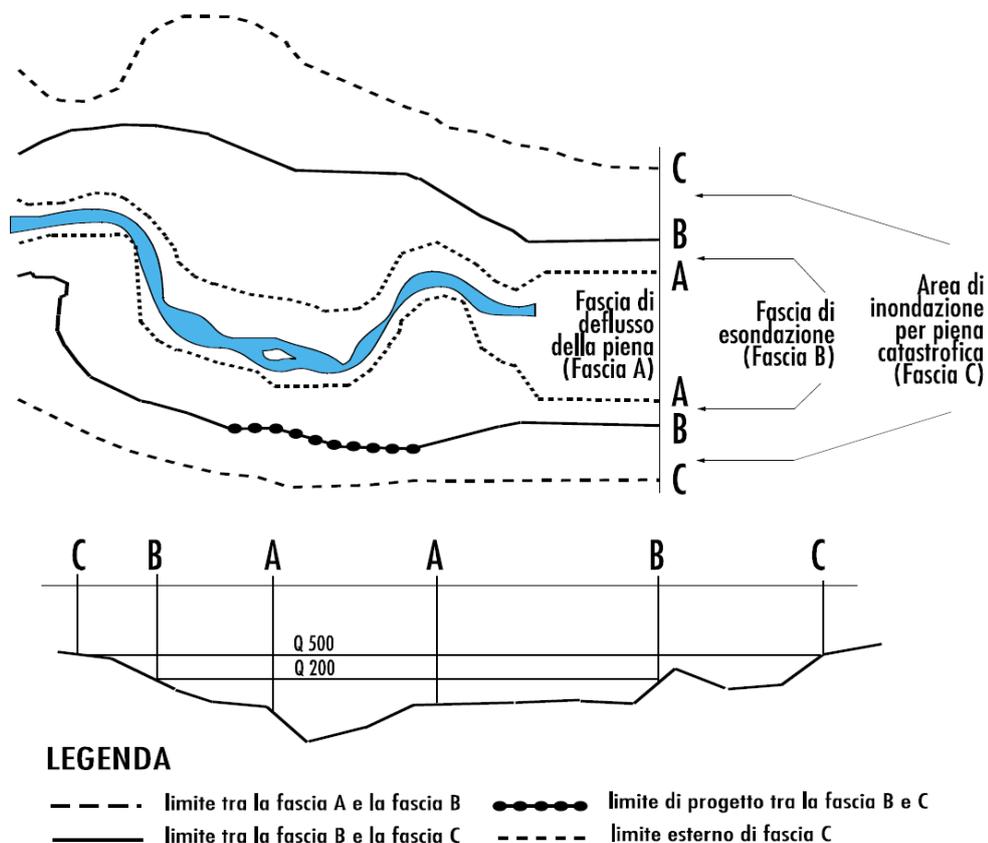


Figura 3.3 - Schema per la definizione delle fasce fluviali

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 20 di 88	

L'individuazione delle fasce rappresenta l'assetto di progetto di ciascuno dei corsi d'acqua dei corsi d'acqua, determinando i caratteri idraulici dell'alveo in condizioni di piena e le modalità di uso della regione fluviale dalle stesse perimetrata.

La delimitazione delle fasce fluviali assume un ruolo determinante nella regolamentazione d'uso del territorio in quanto ad essa sono collegate le disposizioni delle norme di attuazione che impongono indirizzi, incentivi e vincoli riconducibili ai seguenti punti:

Nella fascia A di deflusso della piena:

- garantire il deflusso della piena, evitando ostacoli e interferenze negative sulle condizioni di moto;
- consentire la libera divagazione dell'alveo, assecondandone la naturale tendenza evolutiva, ovunque non controllata da opere idrauliche;
- garantire la tutela e il recupero delle componenti naturali dell'alveo, con particolare attenzione a quelle parti funzionali al mantenimento di un buon regime idraulico.

Nella fascia B di esondazione:

- garantire il mantenimento delle aree di espansione naturale per la laminazione della piena;
- contenere ed eventualmente ridurre la vulnerabilità degli insediamenti e delle infrastrutture presenti;
- garantire il mantenimento e il recupero dell'ambiente fluviale e la conservazione dei valori paesaggistici, storici, artistici e culturali.

Nella fascia C di inondazione per piena catastrofica:

- segnalare le condizioni di rischio idraulico residuo, ai fini della riduzione della vulnerabilità degli insediamenti, in rapporto alle funzioni di protezione civile.

Per quanto riguarda il fiume Olona, il quadro della definizione delle fasce fluviali può essere rappresentato suddividendo il fiume in tre tratti.

1. Da Bregazzana a Torba: l'alveo è prevalentemente monocursale sinuoso e scorre incassato entro alti terrazzi; il limite della fascia di esondazione coincide in generale

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 21 di 88	

con la scarpata morfologica alla base di tali terrazzi e in alcuni tratti si attesta su limiti di progetto, a protezione degli insediamenti.

La fascia assume ampiezza variabile da qualche decina di metri, dove coincide con le sponde alte dell'alveo, fino a 350-400 m, dove aumenta la di stanza fra i due orli del terrazzo principale.

2. Da Torba a Parabiago: l'alveo è monocursale incassato con andamento sinuoso. Il limite della Fascia B coincide prevalentemente con la scarpata morfologica alla base dei terrazzi, in molti tratti sufficienti a contenere i livelli della piena di riferimento. Assume ampiezza variabile, da qualche decina di metri, dove il limite coincide con le sponde alte dell'alveo, fino a 500-600 m, dove aumenta la distanza fra i due orli del terrazzo principale.
3. Da Parabiago a Rho: l'alveo è monocursale sinuoso, prevalentemente canalizzato, con arginature in frodo. La Fascia B coincide con le sponde dell'alveo inciso o più frequentemente con le arginature in frodo all'alveo stesso, esistenti o di progetto. Ha larghezza di qualche decina di metri, coincidendo prevalentemente con l'ampiezza dell'alveo inciso, salvo locali allargamenti nel settore più prossimo all'abitato di Rho.

La morfologia tipica dell'alveo del fiume Olona nel tratto Parabiago – Rho, determina una delimitazione delle fasce fluviali come quella riportata, a titolo esemplificativo, nello stralcio planimetrico in Figura 3.4, nel quale viene inquadrata un'area prossima all'abitato di Pogliano Milanese, dove la linea ferroviaria corre parallelamente al canale secondario Villaresi.

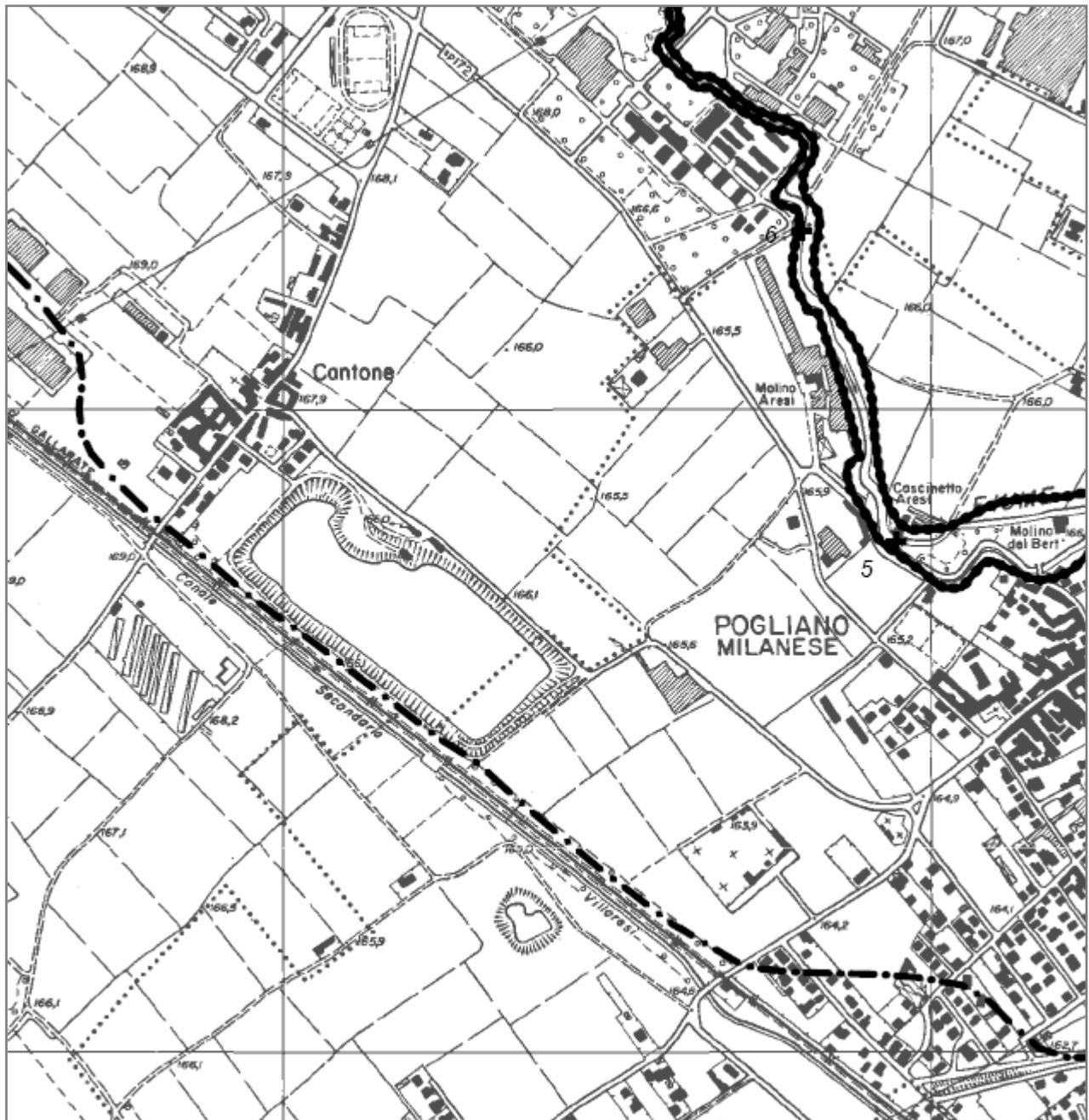


Figura 3.4 - Stralcio della Tavola di Delimitazione delle fasce fluviali (PAI)

La fascia A si presenta molto ristretta, in quanto l'alveo del fiume non è più dotato da ampie golene o da ramificazione secondarie riattivabili e la corrente o si mantiene entro i limiti spondali oppure determina esondazioni nel piano campagna esterno, allagando vaste porzioni di territorio. A questa situazione consegue una fascia B piuttosto estesa.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 23 di 88

Nel caso in figura, la fascia B si estende fino al rilevato della stessa linea ferroviaria.

### Norme di attuazione del PAI

Le *Norme di attuazione* del Piano 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 sezioni distinte:

1. 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;
2. 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;
3. 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.

In generale, definiscono:

- le finalità e gli effetti del Piano;
- 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;
- completano e integrano il quadro normativo di settore definito nei due precedenti Piani stralcio:
  - i) 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.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 24 di 88	

22 con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 9 del 10 maggio 1995;

ii) 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.

I criteri di compatibilità definiti all'art. 38 delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico prescrivono che gli interventi "*non modificano 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 modificano 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;*
- *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 del 11 maggio 1999.*

Gli effetti principali da considerare sono i seguenti:

- 1) Modifiche indotte sul profilo in sviluppo di piena;
- 2) Riduzione della capacità di invaso dell'alveo;
- 3) Interazioni con le opere di difesa idrauliche (opere di sponda e argini) esistenti;
- 4) Opere idrauliche in progetto nell'ambito dell'intervento;
- 5) Modifiche indotte sull'assetto morfologico planimetrico e altimetrico dell'alveo di

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 25 di 88	

inciso e di piena;

6) Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale;

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.

### **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 idrografiche di piccole dimensioni ovvero le procedure adottabili per la stima della portata di piena in un corso d'acqua.

Tale documento tecnico consiglia l'utilizzo di differenti procedure in funzione della disponibilità di dati che possono essere suddivise in due categorie di metodi:

1. 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;
2. 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.

I dati di portata disponibili nel tratto del fiume Olona di nostro interesse non hanno consentito l'applicazione di metodologie statistiche, rendendo necessario il ricorso a procedure appartenenti alla seconda categoria sopra indicata. Tra queste, la direttiva ne propone due, di semplice applicazione e largo utilizzo a livello professionale, applicabili ai casi in cui le modeste dimensioni degli interventi in progetto non giustificano studi idrologici approfonditi.

I metodi che consentono la determinazione delle portate di massima piena per tali

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 26 di 88	

bacini secondari sono:

1. il metodo razionale;
2. il metodo del Curve Number (S.C.S.).

L'applicazione di questi metodi al caso specifico del fiume Olona, se da un lato consente di ottenere una importante informazione sul comportamento idrologico del fiume, dall'altro non consente di ottenere i valori di portata direttamente utilizzabili come riferimento per la progettazione. Il motivo sta nella conformazione fortemente antropizzata del corso d'acqua, che impone un comportamento molto differente da quello naturale.

Secondo la *“Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B”* approvata con deliberazione del Comitato Istituzionale n. 2 dell'11 maggio 1999, la portata di piena di riferimento da assumere per le valutazioni idrauliche è quella per cui è stata condotta la delimitazione della Fascia B.

Nella stessa direttiva, vengono riportati i profili di piena relativi alla portata di riferimento utilizzata per la delimitazione delle Fasce A e B di ciascun corso d'acqua tra quelli interessati dalle operazioni di delimitazione delle fasce fluviali. Tale portata corrisponde alla *portata di progetto del corso d'acqua*, definita come il valore per cui è dimensionato il sistema di opere strutturali di difesa. In assenza di tale sistema, corrisponde al valore massimo per il quale l'estensione delle aree inondate è compatibile con l'assetto insediativo e infrastrutturale del territorio. I profili sono pertanto relativi a condizioni di deflusso della piena nel corso d'acqua che corrispondono all'assetto di progetto dello stesso, quale individuato dalla definizione planimetrica delle Fasce A e B ad esso relative e dal corrispondente modello geometrico e idraulico dell'alveo.

Nelle tabella 7 allegata alla suddetta direttiva, riprodotta in parte nella Tabella 4.1, vengono riportati i valori delle portate di piena per una serie di sezioni idrografiche lungo il fiume Olona individuate dalle progressiva chilometrica.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

Bacino	Corso d'acqua	Sezione		Superficie km <sup>2</sup>	Q20 m <sup>3</sup> /s	Q100 m <sup>3</sup> /s	Q200 m <sup>3</sup> /s	Q500 m <sup>3</sup> /s	Idrometro
		Progr.(km)	Cod.						Denomin.
Olona	Olona	10.184	50	Ponte Gurone	97	-	118	-	-
Olona	Olona	16.467	43	Gornate Olona	135	-	72	-	-
Olona	Olona	24.921	32	Fagnano Olona	156	-	61	-	-
Olona	Olona	31.710	25	Olgiate Olona	180	-	53	-	-
Olona	Olona	42.799	10	Nerviano	227	-	59	-	-
Olona	Olona	49.112	1	Rho	242	-	59	-	-

*Tabella 3.1 - Portate di piena per il fiume Olona*

In caso di disponibilità di informazioni di dettaglio circa la morfologia dell'alveo, dati idrologici, ecc. possono essere considerati scostamenti locali del profilo di piena rispetto a quello ufficiale, con l'obbligo di darne comunicazione all'Autorità di Bacino, che provvederà a validare i dati e ad aggiornare le tabelle di riferimento.

### **3.1.2 Piano di gestione del rischio di alluvioni PGRA**

Il 22 dicembre 2000 è stata adottata la Direttiva 2000/60/CE per la tutela delle acque, recepita in Italia attraverso il d.lgs. n.152 del 3 aprile 2006. L'articolo n. 64 prevede la ripartizione del territorio nazionale in 8 distretti idrografici, ciascuno dei quali dotato di piano di gestione, la cui competenza spetta alla corrispondente Autorità di distretto idrografico.

Le norme comunitarie prevedono l'obbligo di predisporre per ogni distretto, a partire dal quadro della pericolosità e del rischio di alluvioni definito con l'attività di mappatura, uno o più Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (art. 7 D.Lgs. 49/2010 e art. 7 Dir. 2007/60/CE), contenenti le misure necessarie per raggiungere l'obiettivo di ridurre le conseguenze negative dei fenomeni alluvionali nei confronti, della salute umana, del territorio, dei beni, dell'ambiente, del patrimonio culturale e delle attività economiche e sociali. In particolare, il PGRA dirige l'azione sulle aree a rischio più significativo, organizzate e gerarchizzate rispetto all'insieme di tutte le aree a rischio e definisce gli obiettivi di sicurezza e le priorità di intervento a scala distrettuale, in modo concertato fra tutte le Amministrazioni e gli Enti gestori, con la partecipazione dei portatori di

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 28 di 88	

interesse e il coinvolgimento del pubblico in generale.

Le misure del piano si concentrano su tre obiettivi principali:

- migliorare nel minor tempo possibile la sicurezza delle popolazioni esposte utilizzando le migliori pratiche e le migliori tecnologie disponibili a condizione che non comportino costi eccessivi;
- stabilizzare nel breve termine e ridurre nel medio termine i danni sociali ed economici delle alluvioni;
- favorire un tempestivo ritorno alla normalità in caso di evento.

L'articolazione su più livelli territoriali e la conseguente declinazione delle linee di azione generali in obiettivi locali sempre più precisi e pertinenti è un passaggio importante per organizzare le azioni in ordine di priorità e meglio allocare i finanziamenti sulle azioni più efficaci ed urgenti.

Il piano tiene conto inoltre della attuale organizzazione del sistema nazionale per la prevenzione, previsione e gestione dei rischi naturali per favorire l'attuazione delle misure e per confermare che le autorità statali, regionali e locali, con le loro azioni congiunte, lavorano insieme per la gestione dei rischi di alluvioni.

Il territorio oggetto di intervento ricade nell'area di competenza dal **Distretto Idrografico Padano**.

La rilevante estensione del bacino del fiume Po e la peculiarità e diversità dei processi di alluvione sul suo reticolo idrografico hanno reso necessario effettuare la mappatura della pericolosità secondo approcci metodologici differenziati per i diversi ambiti territoriali, di seguito definiti:

- Reticolo principale (RP);
- Reticolo secondario collinare e montano (RSCM);
- Reticolo secondario di pianura (RSP);
- Aree costiere marine (ACM);
- Aree costiere lacuali (ACL).

Le mappe delle aree allagabili rappresentano l'estensione massima degli allagamenti conseguenti al verificarsi degli scenari di evento riconducibili ad eventi di elevata, media e scarsa probabilità di accadimento.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 29 di 88

Le perimetrazioni riguardano tutti e tre gli scenari di piena previsti dalla Direttiva ed individuano le aree interessate da fenomeni di lento e progressivo allagamento. Sono state delimitate utilizzando la regolarizzazione statica dei livelli storicamente registrati alle principali stazioni di misura e il DTM.

Gli ambiti e i soggetti attuatori sono:

AMBITO TERRITORIALE	SOGGETTO ATTUATORE
Reticolo idrografico principale (RP)	Autorità di bacino del fiume Po
Reticolo secondario collinare e montano (RSCM)	Regioni
Reticolo secondario di pianura (RSP)	Regioni con il supporto di URBIM e dei Consorzi di bonifica
Aree costiere lacuali (ACL)	Regioni con il supporto di ARPA e dei Consorzi di regolazione dei laghi
Aree costiere marine (ACM)	Regioni

Gli scenari di inondazione invece sono:

Direttiva Alluvioni		Pericolosità	Tempo di ritorno individuato per ciascun ambito territoriale (anni)				
Scenario	TR (anni)		RP	RSCM (legenda PAI)	RSP	ACL	ACM
Elevata probabilità di alluvioni (H = high)	20-50 (frequente)	P3 elevata	10-20	Ee, Ca RME per conoide ed esondazione	Fino a 50 anni	15 anni	10 anni
Media probabilità di alluvioni (M = medium)	100-200 (poco frequente)	P2 media	100-200	Eb, Cp	50-200 anni	100 anni	100 anni
Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi (L = low)	Maggiore di 500 anni, o massimo storico registrato (raro)	P1 bassa	500	Em, Cn		Massimo storico registrato	>> 100 anni

Le condizioni di pericolosità nell'area di interesse sono riportate negli elaborati grafici annessi, la figura seguente rappresenta un estratto della carta della pericolosità da alluvione dedotta dal Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 30 di 88	

#### 4 STUDI PREGRESSI

Le acque del fiume Olona sono da sempre state utilizzate in maniera intensiva per la produzione di energia elettrica, per l'alimentazione di mulini o di derivazioni irrigue, per le necessità derivanti dalle lavorazioni effettuate nelle numerose attività industriali ubicate lungo il suo corso.

Il massiccio sfruttamento delle acque del fiume ha comportato notevoli interventi dell'uomo, che, nel corso degli anni, ha costruito in alveo numerosi manufatti destinati a realizzare le derivazioni e ha costretto il corso d'acqua a scorrere, canalizzato, tra murature d'argine, scogliere o pareti di edifici. Sono infatti presenti innumerevoli restringimenti di sezione, ponti e attraversamenti, traverse e soglie di fondo ed alcuni tratti tombinati, spesso con significativa influenza sul comportamento idraulico delle correnti fluviali, in particolare sulla formazione verso monte di condizioni di rigurgito e di eventuali esondazioni che modificano la forma e la cronologia delle onde di piena oltre che i valori delle portate.

In definitiva si può dunque affermare che l'Olona, dal punto di vista dell'assetto d'alveo, si presenta oggi come un corso d'acqua artificiale, in genere canalizzato e comunque ricco di manufatti che costituiscono notevoli singolarità e grossi ostacoli al deflusso della corrente, specie in condizioni di piena. Sono oramai ridottissimi i tronchi in cui il fiume è libero di divagare, anche perché gli unici tratti privi di qualunque forma di urbanizzazione limitrofa sono quelli in cui la valle si restringe a tal punto da rendere estremamente difficoltoso lo stesso accesso al corso d'acqua. Per quanto riguarda il regime idraulico, in particolare nella parte montana del bacino, il fiume non presenta le caratteristiche tipiche dei canali artificiali: le portate defluenti nell'Olona hanno origine naturale, dalle sorgenti montane o dai contributi che si generano per effetto degli afflussi meteorici sul bacino. Nella parte valliva, nelle aree antropizzate, i reticoli fognari di drenaggio delle acque meteoriche urbane sono spesso gli unici ad assicurare, nei limiti della loro potenzialità, lo smaltimento delle acque di piena verso i ricettori, e le aree agricole e boschive, adibite storicamente alla laminazione delle piene.

Da quanto emerso dall'analisi delle dinamiche morfo-evolutive del corso d'acqua, si deduce che le portate di massima piena attese in una sezione idrografica ubicata lungo il corso del fiume Olona, non possono essere considerate indipendenti, nemmeno in

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 31 di 88

prima approssimazione, dalla capacità dell'alveo a contenere effettivamente le piene entro le difese arginali. Le esondazioni che si innescano al superamento di una certa portata critica comporta l'impossibilità dell'onda di piena a continuare il processo di formazione ed accrescimento. Dato l'elevato grado di antropizzazione del territorio limitrofo alle sponde del fiume, la propagazione delle piene viene fortemente a dipendere dall'entità delle esondazioni che si manifestano a monte ed alle immissioni concentrate o distribuite presenti lungo il corso d'acqua, per lo più dovute alla presenza dei manufatti di scarico delle acque provenienti da importanti sistemi fognari.

*Da tutte le considerazioni sopra riportate si deduce che le onde di piena che si formano, per vari tempi di ritorno, non possono calcolarsi con modelli puramente idrologici, ma devono derivare da una simulazione integrata idrologica-idraulica che coniughi i modelli idrologici adottati per calcolare le onde di piena confluenti dai sottobacini contribuenti con il modello dell'asta principale, che dovrà di conseguenza descrivere adeguatamente il comportamento idraulico sia dei manufatti che producono singolarità sia degli invasi concentrati o diffusi, liberi o regolari che si formano durante le piene nelle aree golenali e di espansione adiacenti agli alvei.*

Nel corso degli anni si sono succeduti diversi studi idraulici per individuare gli interventi necessari all'adeguamento dell'asta del Fiume Olona in rapporto ai deflussi naturali del bacino idrografico sotteso e compatibilmente con le aree di esondazione dello stesso. Si riportano di seguito gli studi utilizzati come riferimento per il progetto in esame.

#### **4.1 STUDIO DI FATTIBILITÀ DELLA SISTEMAZIONE IDRAULICA DEI CORSI D'ACQUA NATURALI E ARTIFICIALI ALL'INTERNO DELL'AMBITO IDROGRAFICO DI PIANURA LAMBRO – OLONA (SDF)**

Lo *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona*" (SDF), redatto del 2003, è stato commissionato dall'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Nel corso di redazione dello "Studio di fattibilità", si è giunti alla mappatura del territorio a rischio di esondazione, utilizzando una metodologia basata su una fase

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 32 di 88	

preliminare di valutazione della probabilità di esondazione ed alla conseguente individuazione delle fasce fluviali mediante simulazione matematica dei fenomeni di propagazione.

L'attività di modellazione matematica ha riguardato inizialmente la condizione attuale dell'alveo con la conseguente delimitazione delle aree di allagamento che lungo il tratto si producono per eventi di differente tempo di ritorno.

Le aree di allagamento di assegnato tempo di ritorno determinate dall'analisi idraulica, costituiscono un utile confronto con le fasce A, B e C determinate nell'ambito del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), che resta lo strumento normativo di riferimento.

Nell'ambito delle analisi idrologiche ed idrauliche svolte sono state definite le condizioni di deflusso della piena di riferimento, di tempo di ritorno di 100 anni, lungo l'asta dell'Olona da Induno Olona fino all'ingresso nella tombinatura di Milano, con determinazione degli idrogrammi di portata e di livello idrico in tutte le sezioni topografiche rilevate nell'apposita attività di campo eseguita nell'ambito dello stesso studio; in base alla delibera del Comitato Istituzionale n.12 del 18 marzo 2008 tale studio, relativamente agli esiti delle indagini conoscitive, è da considerarsi quadro di riferimento aggiornato del PAI.

Ricordando la definizione di portata di riferimento (valore per cui è dimensionato il sistema di opere strutturali di difesa) è importante segnalare che attraverso un'attenta analisi delle simulazioni derivanti dallo "Studio di fattibilità" sono stati individuati un piano di interventi di difesa idraulica mirati a conseguire un ben preciso assetto idrologico.

Nello studio è stato definito un **assetto di progetto** ( $T_r = 100$  anni) che individua tutti gli interventi necessari al fine di restituire il più possibile al fiume gli spazi che naturalmente gli competono, garantendo al contempo il massimo grado di sicurezza possibile agli insediamenti urbani attualmente esistenti in fregio al corso d'acqua.

La fascia B di progetto si riferisce esattamente a questa configurazione finale, non rappresenta più un limite entro il quale controllare il corso d'acqua ma un limite al di fuori del quale le infrastrutture, gli abitanti e gli edifici esistenti devono risultare protetti.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 33 di 88	

Gli obiettivi prefissati possono essere raggiunti attraverso un insieme di interventi opportunamente studiati, in particolare possono essere classificati come:

- Interventi di laminazione delle piene che permettono di ridurre le portate ed i volumi proseguiti verso valle;
- Interventi di riduzione degli apporti urbani in ingresso al corso d’acqua, attraverso una limitazione agli scarichi fognari;
- Interventi per garantire una officiosità idraulica il più possibile omogenea soprattutto all’interno dei centri abitati.

La realizzazione di tutti gli interventi previsti insieme all’adeguamento di alcuni manufatti insufficienti permetterà, secondo i risultati definiti dallo “Studio di fattibilità”, l’eliminazione delle aree di esondazione all’interno dei centri abitati. Nei tratti non urbanizzati si avranno ancora localmente aree a domanda di sicurezza moderata in cui il fiume viene lasciato esondare in modo da garantire un maggior grado di sicurezza alle aree con domanda di sicurezza più elevata.

Considerando che i diversi interventi strutturali non possono essere realizzati contemporaneamente, soprattutto per individuare i fondi necessari per la costruzione, nello Studio citato sono stati individuate una scala di priorità, sulla base del beneficio in termini di riduzione degli allagamenti che questi sono in grado di fornire soprattutto nelle aree a domanda di sicurezza elevata. Gli interventi strettamente necessari sono stati quindi inquadrati all’interno dell’**assetto transitorio**, inserite nel modello le opere necessarie sono stati estrapolati i risultati per un Tr pari a 100 anni e un Tr di 10 anni (scelto a valle di un’analisi di rischio).

Le simulazioni con modello matematico hanno considerato tali scenari di intervento ed i risultati ottenuti rappresentano un utile riferimento alla progettazione ed alla valutazione della compatibilità idraulica degli interventi, in quanto rispondenti alla stessa definizione di portata di riferimento indicata nella direttiva dell’AdBPO.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 34 di 88	

#### 4.2 ANALISI DELLE INTERFERENZE DEI MANUFATTI DI ATTRAVERSAMENTO INADEGUATI AL DEFLUSSO DELLE PIENA DI RIFERIMENTO

In coerenza con le indicazioni metodologiche dettate dalle direttive del PAI, l’Agenzia Interregionale del fiume PO (AIPO) ha provveduto ad effettuare una “*Analisi delle interferenze dei manufatti di attraversamento inadeguati al deflusso della piena di riferimento (ai sensi degli artt. 19 e 38 delle Norme di Attuazione del PAI)*”.

Si riporta la sintesi di tale analisi:

“Nell’ambito delle analisi idrologiche ed idrauliche svolte nello *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro-Olona*”, sono state definite le condizioni di deflusso della piena di riferimento, di tempo di ritorno di 100 anni, lungo l’asta dell’Olona da Induno Olona fino all’ingresso nella tombinatura di Milano, con determinazione degli idrogrammi di portata e di livello idrico in tutte le sezioni topografiche rilevate nell’apposita attività di campo eseguita nell’ambito dello stesso studio.

La definizione delle condizioni di deflusso è avvenuta mediante modello numerico di simulazione della formazione e della propagazione dei deflussi.

##### Criticità dell’attraversamento ferroviario esistente

Il ponte presenta intradosso a quota 152,78 m.s.m ed estradosso a quota 154,43 m.s.m. Il ponte risulta funzionante in pressione sia per l’evento caratterizzato da tempo di ritorno di 10 anni sia per quello caratterizzato da tempo di ritorno di 100 anni, con dislivelli monte-valle di oltre 20 cm. Inoltre, per entrambi gli eventi, i livelli idrici provocano esondazioni sia in destra che in sinistra idraulica, sia a monte che a valle del ponte.

##### Criticità del tratto di Olona a valle dell’attraversamento ferroviario esistente

Il modello di simulazione è stato utilizzato per la verifica di due ipotetici scenari futuri di adeguamento dei manufatti di attraversamento inadeguati al deflusso della piena di riferimento, presenti nel tratto oggetto dello studio:

Scenario 1: adeguamento dei quattro ponti esistenti a valle del ponte ferroviario che risultano inadeguati al deflusso sia della piena di riferimento, sia della piena di tempo di ritorno di 10 anni, mantenendo nelle condizioni attuali il ponte ferroviario;

Scenario 2: adeguamento del ponte ferroviario e dei quattro ponti esistenti a valle di esso.

Le esondazioni riguardano il tratto tra il ponte ferroviario e il primo dei due ponticelli e tra il ponte stradale di loc. Campagna Bastaia e il nuovo ponte stradale a valle di esso (quest’ultimo, peraltro, funzionante, comunque, a pelo libero).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 35 di 88	

Procedendo da monte verso valle, già per l'evento caratterizzato da tempo di ritorno di 10 anni, il Ponte stradale SP 130, i due ponticelli di loc. Lucernate e il ponte stradale di loc. Campagna Bastaia risultano tutti inadeguati e funzionanti in pressione, alcuni anche tracimati.

In tutti gli scenari considerati, pur cambiando i livelli, il ponte ferroviario rimarrebbe fortemente inadeguato, con funzionamento in pressione con battente di circa 140 cm.

Inoltre anche gli altri ponti sopra elencati rimarrebbero nelle stesse condizioni di criticità, cioè soggetti a tracimazione o comunque funzionanti in pressione.

### Conclusioni

Le analisi svolte hanno confermato la condizione di criticità del ponte ferroviario della linea Rho-Gallarate, in località Rho, e del tratto di asta dell'Olona a valle di esso. In particolare nelle conclusioni si riporta:

*“Nelle condizioni attuali il completo adeguamento dei ponti interferenti nel tratto determina un aumento di portata verso Milano. Tale situazione è incompatibile con le condizioni di valle, né è ammissibile l'aumento di portata scaricata al CSNO attraverso la presa Olona 2. Pertanto, in attesa della realizzazione degli interventi di laminazione previsti dal PAI, è preferibile non modificare le condizioni di deflusso dominate dall'interferenza data dalle opere di attraversamento esistenti.”*

### **4.3 EVOLUZIONI PROGETTUALI DELL'ATTRAVERSAMENTO SUL FIUME OLONA**

Il progetto di potenziamento della linea ferroviaria Rho – Gallarate **presentato nel 2009** in Conferenza dei Servizi, prevedeva, in uscita dalla stazione di Rho, la realizzazione di 5 nuovi binari (1 linea DD, 1 linea Novara e 3 magazzini Sogemar), in affiancamento a quelli esistenti. La costruzione dei suddetti binari risultava strettamente legata alla richiesta di ampliamento della larghezza dell'attuale sede ferroviaria, con conseguente necessità di adeguamento delle strutture di attraversamento dei corsi d'acqua e delle eventuali opere idrauliche che, per loro posizione, risultavano incompatibili con il futuro assetto della linea ferroviaria.

In particolare il progetto prevedeva la realizzazione di nuovi manufatti di attraversamento con luce superiore a quella dell'attuale opera di attraversamento ferroviario sul fiume Olona; per questo corso d'acqua le competenze in materia di pianificazione idraulica sono demandate all'Autorità di Bacino del Fiume Po (AdBPo) mentre l'espressione del parere di compatibilità, ai sensi dell'art. 38 delle Norme di attuazione del Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), è di competenza di

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 36 di 88	

Agenzia Interregionale del Fiume Po (AIPO). Quest'ultimo aveva espresso in merito un parere non conclusivo, con la richiesta di ulteriori approfondimenti congiunti.

L'intero progetto definitivo è stato, in ogni caso, approvato il 13 maggio 2010 dal CIPE.

Nella successiva fase di predisposizione del PD per la gara d'appalto, Italferr ha coinvolto - come richiesto - l'Autorità di Bacino nell'approfondimento della soluzione progettuale dell'attraversamento che presenta le criticità esposte nel parere depositato in CdS 2009. In data **18 gennaio 2011**, presso la sede dell'Autorità di Bacino del fiume Po a Parma è stata convocata una riunione tra RFI, Italferr, l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPO) e l'Autorità di bacino del fiume Po (AdBPo) per illustrare le problematiche idrauliche inerenti il progetto del nuovo attraversamento ferroviario del fiume Olona a Rho e poter quindi ottenere il parere di compatibilità.

Nel corso dell'incontro, AdBPo aveva evidenziato l'opportunità di verifica immediata dell'interferenza del ponte nuovo con il deflusso della piena dell'Olona nello scenario ipotetico in cui vengano adeguati tutti i ponti esistenti, compreso quello ferroviario, che, in base al più recente studio da essa condotto risultano oggi interferenti.

Ciò al fine di determinare l'eventuale ostacolo alle condizioni di deflusso determinato dalla nuova opera, indipendentemente dalle altre.

Sulla base di tali indicazioni, lo studio di fattibilità presentato da Italferr all'AdBPo si poneva l'obiettivo di valutare le condizioni di funzionamento del nuovo manufatto ferroviario in progetto nello scenario proposto dall'AdBPo; in particolare : *“Dovranno essere rimosse le interferenze degli altri ponti a valle del ponte ferroviario e anche l'interferenza del ponte ferroviario esistente, al fine di confrontare le diverse condizioni ed evidenziare l'interferenza del ponte ferroviario esistente.*

*Sulla base di tale verifica dovranno essere proposte le soluzioni tecniche possibili al fine della riduzione del grado di rischio per il territorio connesso all'interferenza dell' opera di attraversamento ferroviaria e delle altre esistenti a valle di essa nel tratto in questione.”*

Tutte le verifiche furono condotte considerando i due seguenti assetti, riportati nello studio di fattibilità svolta dall'AdBPo ovvero:

1. assetto nuovo (“di progetto”) nel quale, per il tempo di ritorno di 10 anni, per effetto degli interventi prioritari previsti sul bacino dell'Olona, la portata in arrivo al ponte

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 37 di 88	

ferroviario si ridurrebbe a 43,6 m<sup>3</sup>/s;

2. per effetto di tutti gli interventi previsti, invece, per il tempo di ritorno di 100 anni, la portata in arrivo al ponte ferroviario potrebbe essere ridotta a 42,5 m<sup>3</sup>/s.

Sulla base di modellazioni idrauliche monodimensionali e di considerazioni di tipo tecnico si era potuti quindi arrivare alla formulazione di diversi scenari di funzionamento atti a ridurre al minimo la vulnerabilità dell'intero sistema in progetto.

In data **3 marzo 2011**, nella riunione tra RFI, Italferr e l'Autorità di bacino del fiume Po (AdBPo), si riconosce l'opportunità di procedere alla valutazione della fattibilità di un by-pass dei due ponti ed alla stima dell'efficacia di tale dispositivo, anche al fine di individuare le sezioni di possibile interferenza fra le opere, ferroviarie e quelle idrauliche, al fine di prevedere tutti gli accorgimenti necessari a garantire la fattibilità del by-pass anche in tempi successivi, tra cui la garanzia di disponibilità dei sedimenti. Si concorda che la progettazione di fattibilità preveda la possibilità di realizzare, in concomitanza con i lavori di realizzazione del nuovo ponte, anche quei dispositivi e quelle parti del by-pass la cui realizzazione potrebbe essere pregiudicata in via definitiva dalla realizzazione del nuovo ponte stesso o la cui realizzazione in tempi successivi possa interferire con la piena funzionalità della ferrovia.

Successivamente, nel 2012, il TAR Lombardia, sezione III Milano, ha annullato la delibera CIPE del 13 maggio 2010, n. 33 di approvazione del progetto definitivo del "Potenziamento linea Gallarate – Rho, primo lotto funzionale Rho – Parabiago e Raccordo a Y.

Di conseguenza, RFI ha ritenuto di avviare nell'**ottobre 2013**, una nuova procedura finalizzata all'approvazione del progetto definitivo del "Potenziamento della Linea Ferroviaria Rho – Gallarate – Arona, tratta Rho – Gallarate. Quadruplicamento Rho – Parabiago e raccordo a Y ai sensi dell'art. 167 comma 5 del D.Lgs. 163/2006. Tale procedura, come noto, prevede la facoltà di avviare la procedura di localizzazione dell'opera e di valutazione di impatto ambientale sulla scorta del progetto definitivo, anche indipendentemente dalla redazione e dalla approvazione del progetto preliminare. L'approvazione del progetto comporta l'accertamento della compatibilità, l'apposizione del vincolo espropriativo e la contestuale dichiarazione di pubblica utilità.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 38 di 88	

Nel progetto definitivo **emesso nel 2013** l'attraversamento del fiume Olona da parte del singolo binario nord, previsto in progetto in corrispondenza della progressiva chilometrica 0-112, è stato dunque ipotizzato realizzato con un solettone in c.a su pali di grande diametro, conformato in modo tale da non interferire con la sede naturale dell'importante corso d'acqua. La nuova opera in progetto, studiata con le indicazioni fornite dall'Autorità di Bacino, garantisce una sezione idraulica netta di larghezza 17m con intradosso minimo a q.ta 153.57 m.s.l.m., e franchi idraulici maggiori di quelli che si hanno poco più a valle in corrispondenza dell'opera di attraversamento della linea storica.

Il progetto è stato trasmesso altresì al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per acquisire il parere di cui all'art. 165 comma 4 del D.Lgs. 163/2006.

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel proprio Parere 98/2014 reso dall'assemblea nell'adunanza del 26 settembre 2014 ha ritenuto che *“ferme restando le specifiche competenze in materia del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, il progetto definitivo relativo al “potenziamento della linea ferroviaria Rho – Arona. Tratta Rho – Gallarate. Quadruplicamento Rho – Parabiago e Raccordo a Y .... debba essere rielaborato, integrato ed aggiornato secondo le osservazioni e prescrizioni riportate ..... al fine di acquisire il parere di questo Consiglio Superiore, non sussistendo allo stato i presupposti tecnici e giuridici per l'espressione dello stesso parere”*.

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel parere trasmesso evidenzia delle criticità in riferimento agli aspetti idraulici a cui si cerca di dare risposta con la presente relazione e gli elaborati ad essa connessi.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 39 di 88

## 5 DATI DI BASE

In questo capitolo si illustrano i dati di base utilizzati per lo sviluppo dello studio idraulico del nuovo ponte ferroviario sul Fiume Olona.

Il tratto fluviale studiato, come precedentemente accennato, è stato oggetto di numerosi studi ed analisi nel tempo, ai quali si è attinto per una piena conoscenza delle problematiche.

### 5.1 DATI TOPOGRAFICI

Il tratto di fiume Olona analizzato mediante modelli idraulici si estende dalla sezione a valle della deviazione del Canale Scolmatore di Nord Ovest fino all'immissione del t. Lura, per una lunghezza dell'asta di circa 3.3 km.

I dati topografici utilizzati nell'ambito del presente studio per costruire la geometria dei modelli idraulici si basano su:

- rilievo topografico di 58 sezioni del fiume Olona, comprendente l'alveo, le sponde e la parte perifluviale, lungo il tratto in esame



- rilievo degli attraversamenti stradali e ferroviari lungo il tratto in esame;
- rilievo LiDAR del MATTM (2012).

I dati del rilievo LiDAR, sono stati trattati come punti per creare un DTM dell'area di interesse, da utilizzarsi come informazione morfo-altimetrica nella costruzione del

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 40 di 88

dominio di calcolo bidimensionale, esterno all'alveo.

Gli elaborati MDL130D26P7ID0002001A e MDL130D26P7ID0002002A riportano la planimetria delle sezioni rilevate.

## 5.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Le condizioni al contorno per la modellazione degli scenari di piena consistono in:

- condizione a contorno di monte rappresentata dalla portata massima di riferimento, in caso di simulazioni condotte in regime di moto permanente, o da idrogrammi di piena, in caso di simulazioni condotte in regime di moto vario;
- condizione al contorno di valle, rappresentata dalle condizioni idrodinamiche che si instaurano nella sezione estrema di valle.

Per quanto riguarda la condizione al contorno di monte, i valori sono stati ricavati dai dati forniti dall'Autorità di Bacino del fiume Po (si rimanda alla relazione idrologica MDL130d26RHID0001001\_A). In particolare si è fatto riferimento a:

- idrogrammi dello stato attuale (dati aggiornati al 2015) per i tempi di ritorno di 10,100 e 500 anni relativi alla sezione immediatamente a valle del CSNO;
- idrogramma relativo alle simulazioni eseguite nello studio di fattibilità di sistemazione idraulica dell'Olona svolto dalla stessa Autorità di bacino nel 2002-2004, nello scenario di progetto transitorio, per tempo di ritorno di 100 anni.

Lo scenario di progetto transitorio, studiato per un tempo di ritorno di 100 anni, prevede la realizzazione di alcuni degli interventi strutturali previsti lungo l'asta, individuati sulla base del beneficio in termini di riduzione degli allagamenti che questi sono in grado di fornire soprattutto nelle aree a domanda di sicurezza elevata. Gli interventi prioritari individuati dall'Autorità di Bacino e facenti parte dello scenario di progetto transitorio sono:

- Vasca di laminazione in comune di Malnate, località Ponte Gurone da 1.500.000 mc;
- Vasca di laminazione in comune di San Vittore Olona da 2.000.000 mc.

Gli idrogrammi di riferimento alla sezione di monte (sezione immediatamente a valle del

CSNO) sono di seguito riportati.

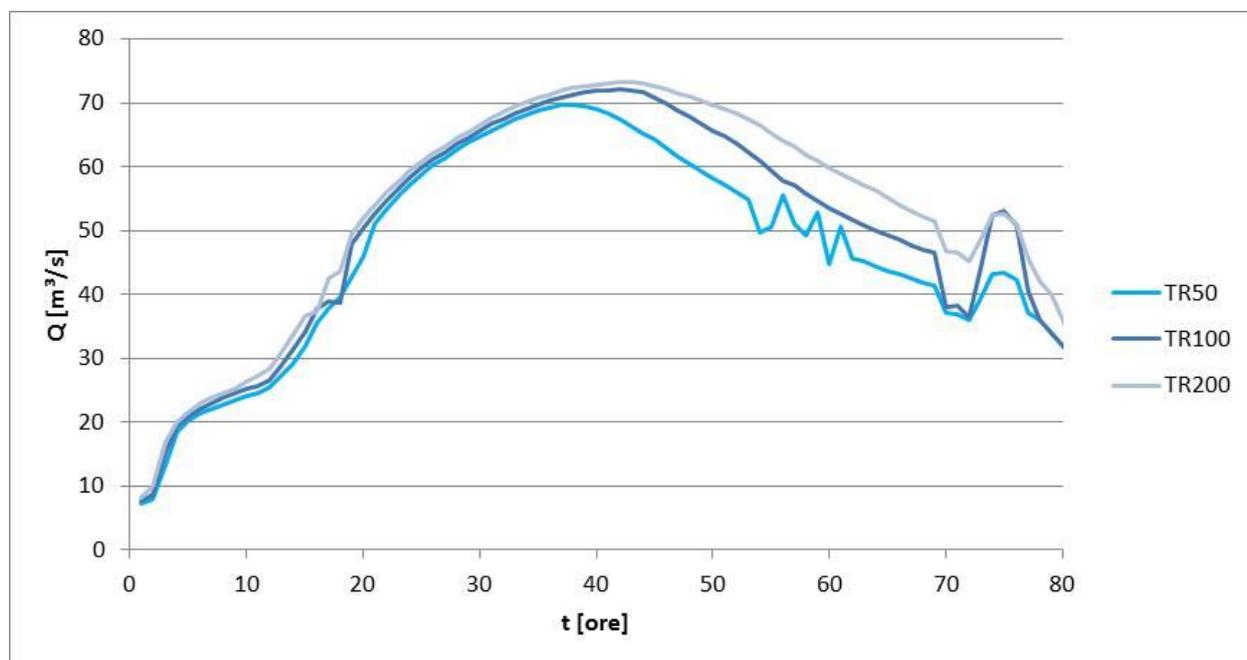


Figura 5.1 – Idrogrammi di piena utilizzati come condizione al contorno del modello idraulico mono-bidimensionale (sezione a valle CSNO)- studio 2015

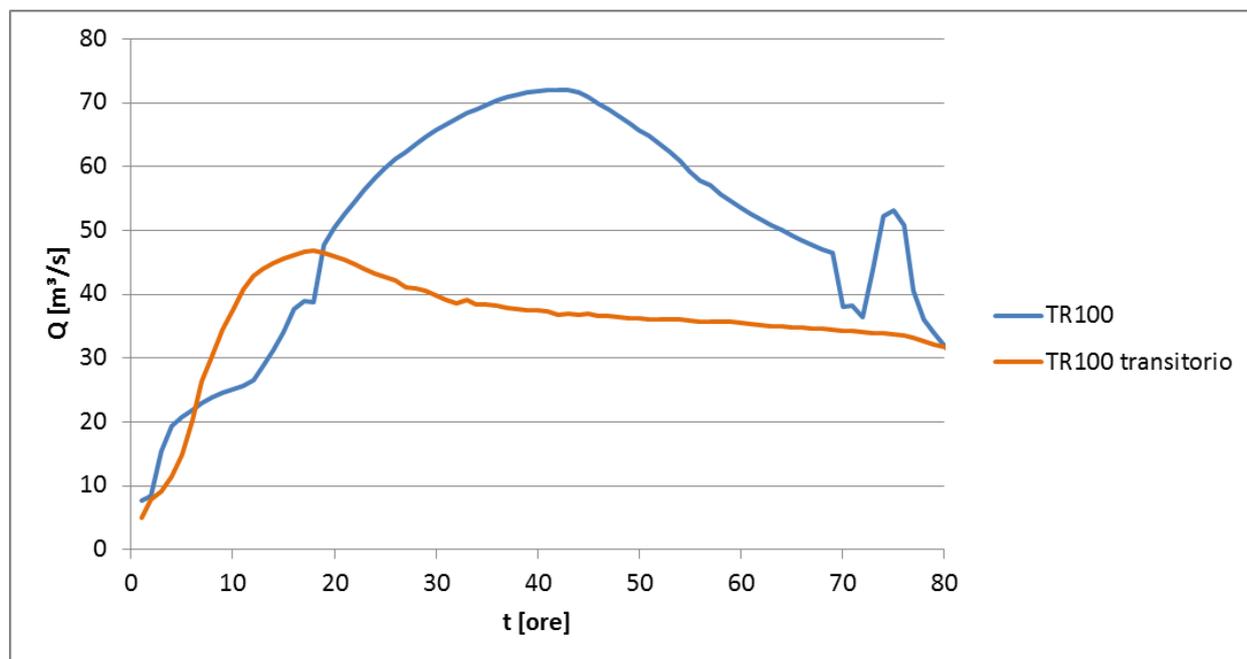


Figura 5.2 – Idrogrammi di piena associati a TR100 riferiti allo scenario attuale (studio 2015) ed allo scenario di progetto transitorio (studio 2002-2003), entrambi utilizzati come condizione al contorno del modello idraulico mono-bidimensionale (sezione a valle CSNO).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

Le portate al colmo per i diversi scenari sono riportati in Tabella 5.1.

	TR50 [anni]	TR100 [anni]	TR200 [anni]	TR100 di progetto (transitorio)
Q max [m <sup>3</sup> /s]	69.7	72.0	73.2	46.8

*Tabella 5.1 - Portate al colmo per diversi tempi di ritorno per il fiume Olona a valle del CSNO*

Per quanto riguarda la condizioni al contorno di valle, si è ipotizzato che nella sezione estrema si instaurino condizioni idrometriche corrispondenti ad un regime di moto uniforme, corrispondente ad una pendenza dello 0.93 ‰.

### 5.3 COEFFICIENTI DI SCABREZZA

Le scabrezze sono state valutate sulla base delle indicazioni fornite in letteratura e del processo di taratura.

La protezione civile ha fornito la scala delle portate in corrispondenza della sezione di Olona\_Rho\_valle\_Deviatore (sezione di monte del nostro intervento) tarata tuttavia per un intervallo limitato di tiranti. Al fine di tarare i modelli ci si è riferiti quindi ai dati forniti dall’Autorità di Bacino del f. Po. Come descritto al successivo par. 6.2.1, sono state confrontate le relazioni portata-tirante in determinate sezioni a monte e valle dell’attraversamento ferroviario.

Sono stati quindi assegnati valori di scabrezza di Manning differenti per l’alveo principale e per le golene, pari a:

- 0.030 m<sup>-1/3</sup>s<sup>1</sup> per l’alveo;
- 0.050 m<sup>-1/3</sup>s<sup>1</sup> per le aree perfluviali e la piana allagabile.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

## 6 VERIFICHE IDRAULICHE

Il presente capitolo descrive l'analisi effettuata relativamente all'interferenza idraulica data del nuovo attraversamento del fiume Olona in località Rho dovuta al nuovo singolo binario previsto in progetto. Tale interferenza viene risolta mediante la costruzione di un ponte a monte dell'esistente.

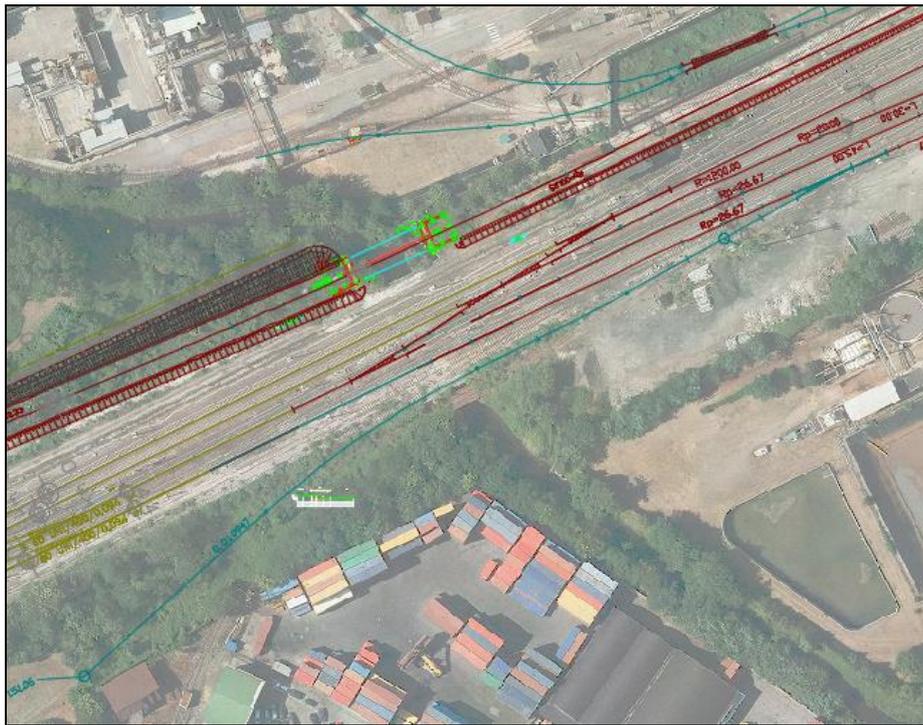


Figura 6.1 – Planimetria nuovo attraversamento ferroviario sul Fiume Olona

Le verifiche idrauliche sono state condotte mediante implementazione sia di un modello idraulico monodimensionale, HEC RAS 5.0.3, sia del modello idraulico monodimensionale InfoWorks ICM.

I seguenti paragrafi descrivono la metodologia di analisi ed i risultati ottenuti.

### 6.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONODIMENSIONALE

Il progetto della nuova struttura di attraversamento è stato analizzato dal punto di vista idraulico dapprima mediante l'implementazione del modello matematico HEC RAS, utilizzato in passato per le verifiche idrauliche sullo stesso tratto del fiume Olona.

Il modello è stato applicato in regime di moto permanente. Le simulazioni idrauliche sono state sviluppate con riferimento a due scenari: configurazione ante operam e

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

configurazione post operam.

Le verifiche idrauliche condotte hanno avuto l'obiettivo di valutare la capacità di portata, a confronto con i risultati precedenti, utilizzando la geometria di calcolo aggiornata sulla base del recente rilievo topografico del 2017.

### 6.1.1 Condizioni ante operam

L'area di studio è stata individuata per una lunghezza dell'asta fluviale pari a 2600 m e la conformazione geometrica del corso d'acqua, nel tratto d'interesse, è stata modellata piano-altimetricamente utilizzando le sezioni dai rilievi eseguiti da Italferr a marzo 2017. Una volta inserita la geometria nel modello matematico, è stato assunto un coefficiente di scabrezza di Manning pari a  $0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^1$  per l'alveo centrale e pari a  $0.035 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^1$  per le sponde.



Figura 6.2 – Foto alveo Fiume Olona

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

### 6.1.2 Condizioni post operam

Nelle condizioni di progetto l'opera proposta riduce al minimo lo spessore dell'impalcato (spessore dell'impalcato 1,36 m) ed è caratterizzata da una sezione di deflusso più ampia rispetto a quella del ponte esistente (con luce netta tra gli allineamenti degli appoggi di 25 m); pertanto la sezione del nuovo ponte risulta maggiore sia in larghezza che in altezza ed è ritenuta la massima possibile nell'attuale configurazione dell'alveo e del piano di campagna.

Oltre all'adeguamento dell'opera ferroviaria l'intervento che appare più funzionale è una riprofilatura dell'alveo.

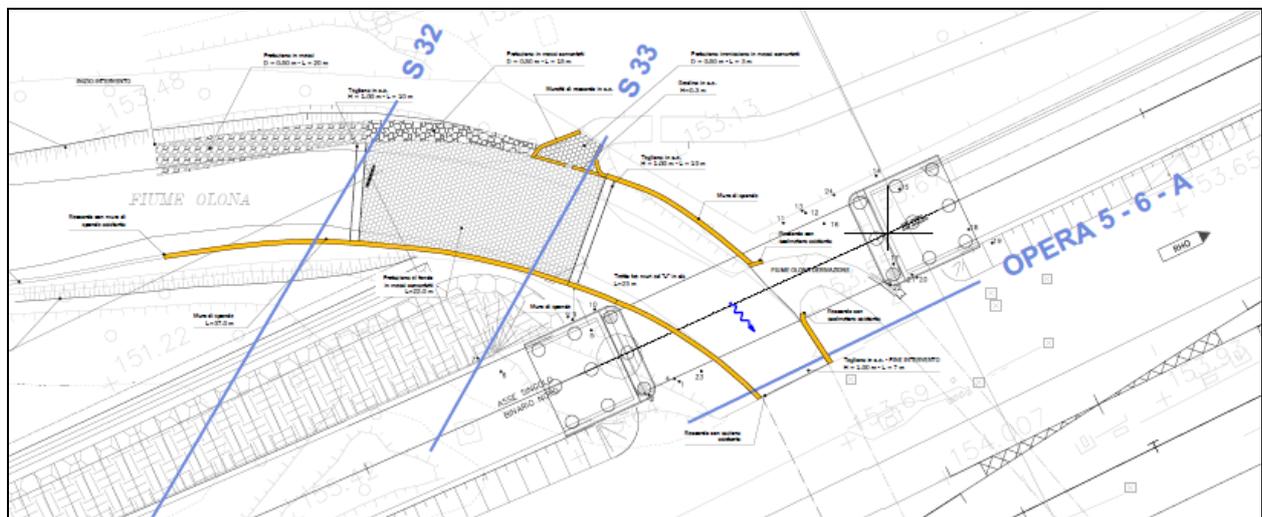


Figura 6.3 – Sistemazione idraulica dell'alveo

La sezione utilizzata per la riprofilatura ha una larghezza di 10 m che corrisponde alla dimensione massima che l'alveo può assumere immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario. La figura seguente riporta la sezione di progetto in corrispondenza del nuovo attraversamento ferroviario.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 46 di 88

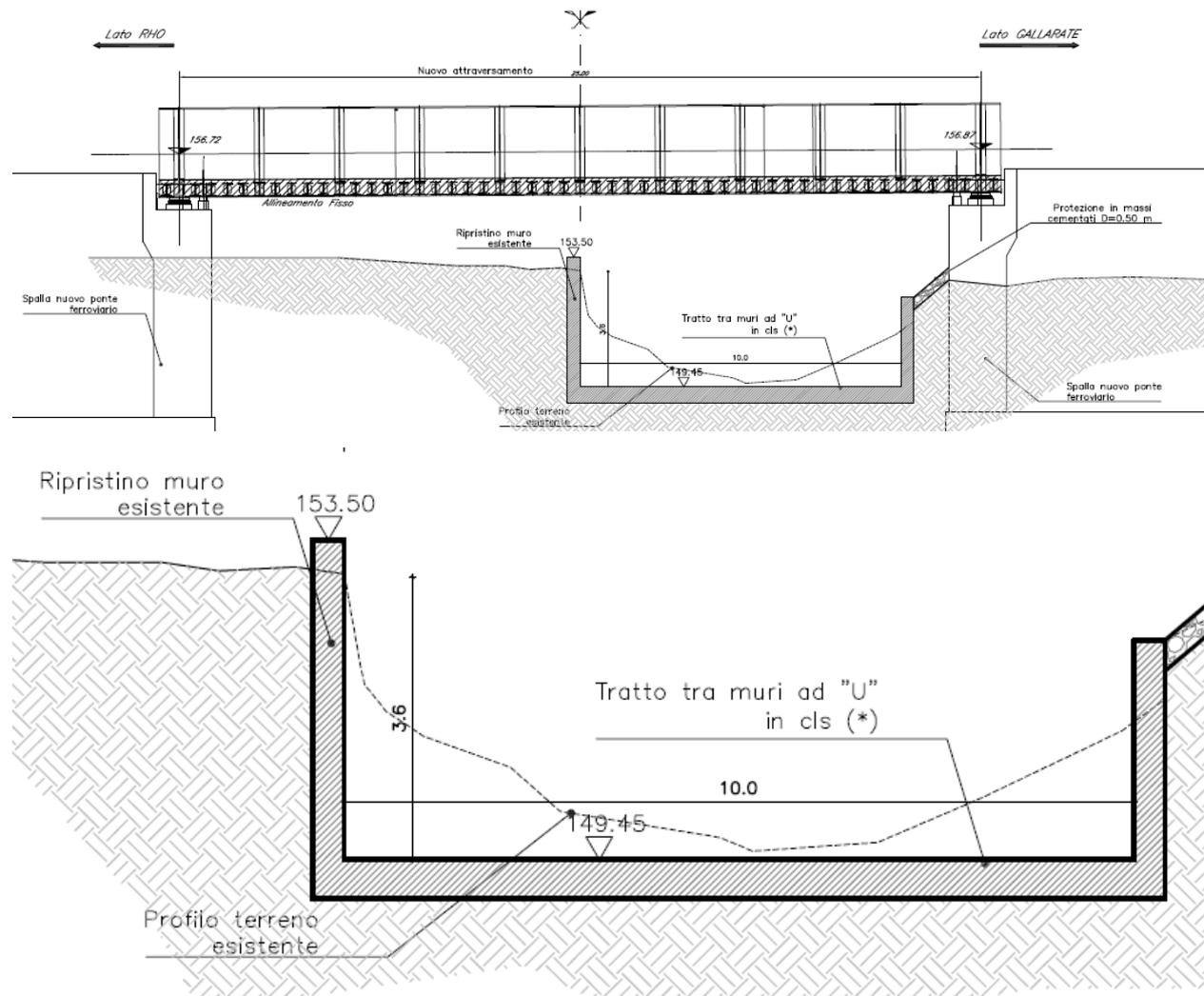


Figura 6.4 – Sezione del nuovo attraversamento ferroviario e dettaglio della riprofilatura dell'alveo, in sua corrispondenza.

Nella condizione post operam è stato previsto a monte il medesimo intervento di sistemazione idraulica mentre sono stati analizzati 2 scenari differenti a valle:

- il primo senza interventi aggiuntivi a valle del ponte ferroviario;
- il secondo con realizzazione di un salto di fondo di 0.45 m immediatamente a valle del ponte e risezionamento per un tratto di circa 700 metri.

 <b>GRUPPO FERROVIE DELLO STATO</b>	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 47 di 88

### 6.1.3 Risultati delle simulazioni

I risultati dello stato ante operam evidenziano, come mostrato dal profilo idrometrico restituito in output dal modello, una situazione fortemente critica; il ponte ferroviario va in pressione con la portata di 43.6 m<sup>3</sup>/s associata a tempo di ritorno 10 anni. La causa principale risulta essere l'esigua sezione di deflusso legata alla larghezza dell'impalcato ferroviario esistente.

Nell'analizzare i risultati del primo scenario, in cui non sono stati previsti interventi a valle del ponte ferroviario, i risultati nella situazione ante operam ed in quella post operam risultano del tutto simili indipendentemente dal tempo di ritorno considerato.

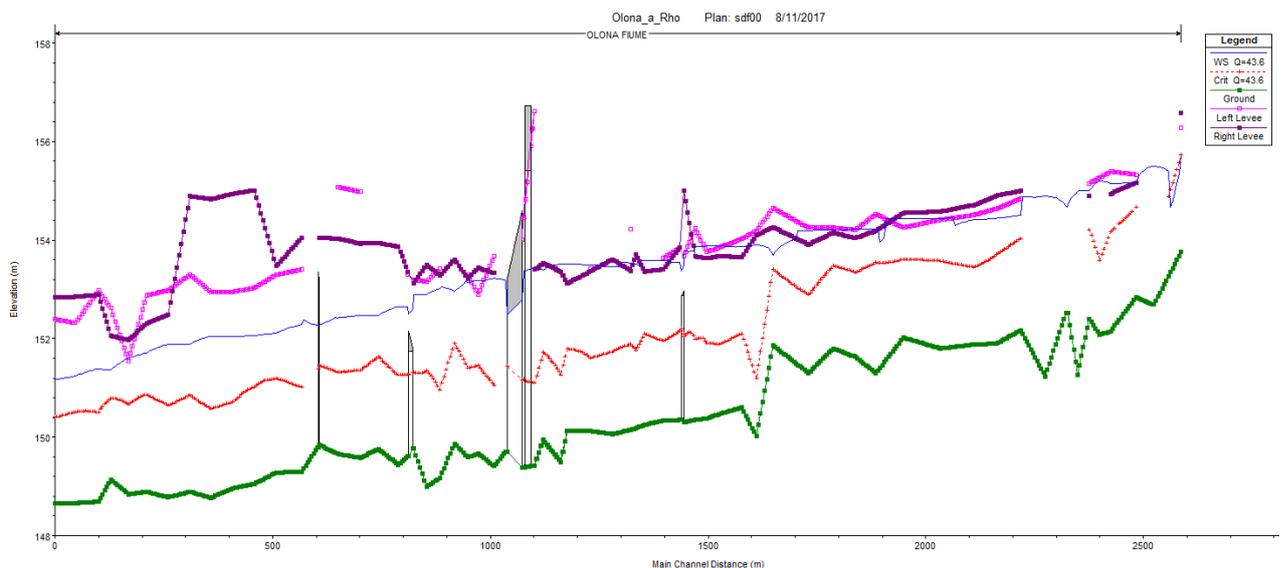


Figura 6.5 – Profilo idrometrico ante operam e post operam primo scenario

Nella situazione post operam con interventi a valle del ponte (secondo scenario), la situazione migliora dal momento che il salto di fondo ed il risezionamento consentirebbero di ridurre i livelli di 60 cm.

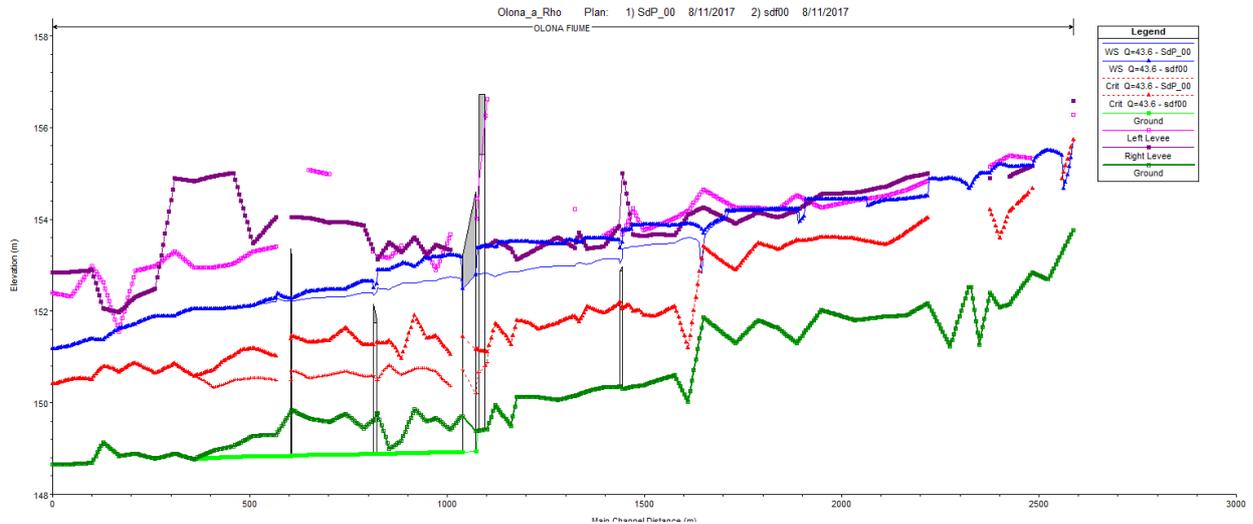


Figura 6.6 – Profilo idrometrico ante operam e post operam per  $Q=43.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

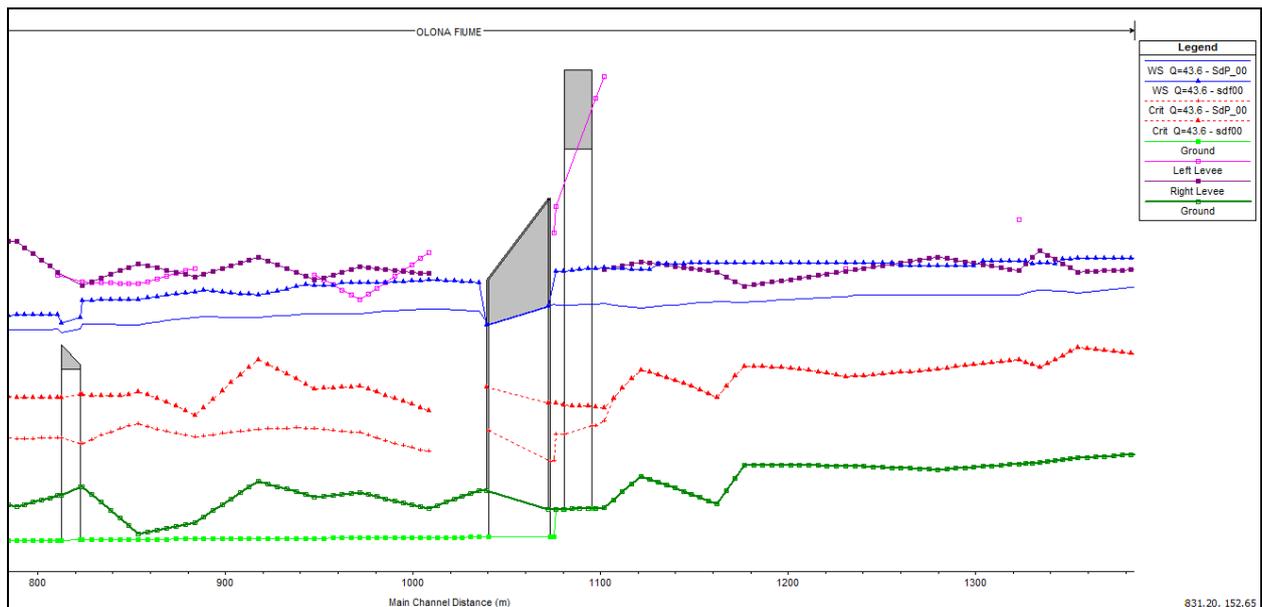


Figura 6.7 – Profilo idrometrico ante operam e post operam per  $Q=43.6 \text{ m}^3/\text{s}$  – dettaglio in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario.

I risultati del modello monodimensionale non tengono tuttavia conto degli effetti di laminazione della piena dovuti all'insufficienza della sezione di deflusso del fiume che non possono essere trascurati infatti, nel caso in esame, sono evidenti le esondazioni sia in destra che in sinistra idraulica, sia a monte che a valle del ponte.

Si ritiene quindi che un modello idraulico mono-bidimensionale, che tiene conto delle esondazioni nei diversi tratti fluviali insufficienti a contenere le portate in esame, sia uno strumento più adatto per simulare la propagazione della piena nel tratto di interesse.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 49 di 88	

## 6.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO MONO-BIDIMENSIONALE

L'analisi idraulica è stata approfondita e completata implementando il modello matematico InfoWorks ICM sviluppato dall'azienda Innowyze (ex HR Wallingford software).

InfoWorks ICM è un completo applicativo di simulazione idraulica, nato per consentire la modellazione numerica integrata di reti di drenaggio costituite da alvei fluviali, reticoli di bonifica e fognature urbane. All'interno di un'unica interfaccia utente, si possono rappresentare sezioni fluviali aperte con approccio monodimensionale, ambiti in cui il moto avviene con andamento bidimensionale, reti di drenaggio chiuse e un numero elevato di tipologie di manufatti presenti in ambito fluviale o fognario (ponti, soglie, sollevamenti, scaricatori di piena ecc.).

Le aste fluviali possono essere liberamente rappresentate, secondo le preferenze dell'utente, con un dominio interamente 2D (comprendente sia l'alveo inciso che le golene) o con uno schema misto (generalmente 1D per l'alveo inciso e 2D per le zone di espansione golenali).

Nell'ambito del presente studio si è scelto di schematizzare la geometria di calcolo mediante un modello 1D per l'alveo inciso e un modello 2D per le aree golenali ed il territorio interessato da probabili allagamenti.

### 6.2.1 Condizioni ante-operam

Il dominio bidimensionale è determinato da una mesh ad elementi triangolari le cui caratteristiche geometriche sono fornite direttamente dal modello digitale del terreno utilizzato e dagli elementi di schematizzazione inseriti al fine di descrivere con accuratezza le variazioni morfologiche ed altimetriche degli elementi realmente presenti sia all'interno che all'esterno dell'alveo (ponti, traverse, argini, rilevati stradali, ecc.).

L'area di calcolo bidimensionale ha un'estensione complessiva di circa 3 km<sup>2</sup>. La Figura 6.8 riporta l'estensione del modello idraulico implementato.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

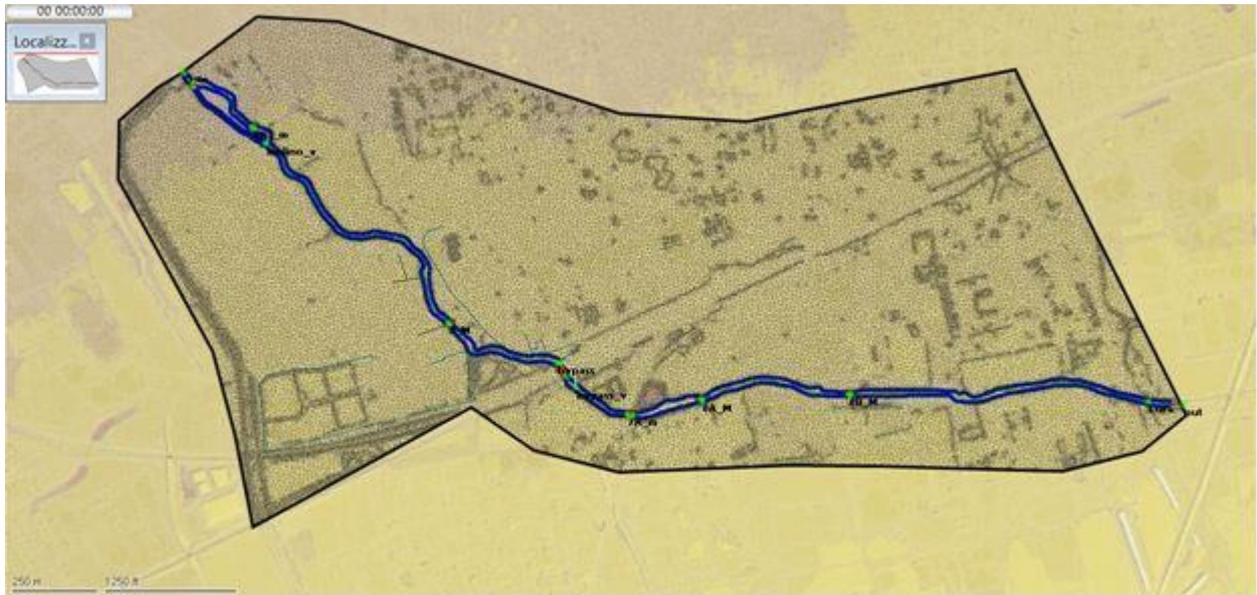


Figura 6.8 – Estensione del modello idraulico mono-bidimensionale.

La procedura di creazione della mesh di calcolo del dominio bidimensionale ha tenuto conto di definire mediante opportuni elementi, quali breaklines, elementi lineari quotati, ecc., la presenza di rilevati e di elementi morfologici significativi per la propagazione della piena nelle aree allagate. La mesh è stata ottenuta mediante un particolare procedimento di calcolo che tiene conto della variazione morfologico-altimetrica del DTM: questa particolare potenzialità è particolarmente utile per dar conto delle variazioni morfologiche del territorio.

### Coefficienti di scabrezza

È stata assegnata una scabrezza di Manning pari a  $0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^1$  per l'alveo e pari a  $0.050 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^1$  per le aree perfluviali e la piana allagabile.

I risultati che si ottengono adottando il valore di scabrezza in alveo pari a  $0.030 \text{ m}^{-1/3}\text{s}^1$  sono del tutto confrontabili con quelli ottenuti e forniti dall'Autorità di Bacino in corrispondenza di alcune sezioni significative (Figura 6.9), nonché con quelli ottenuti con il modello monodimensionale HEC RAS.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 51 di 88

**Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona**

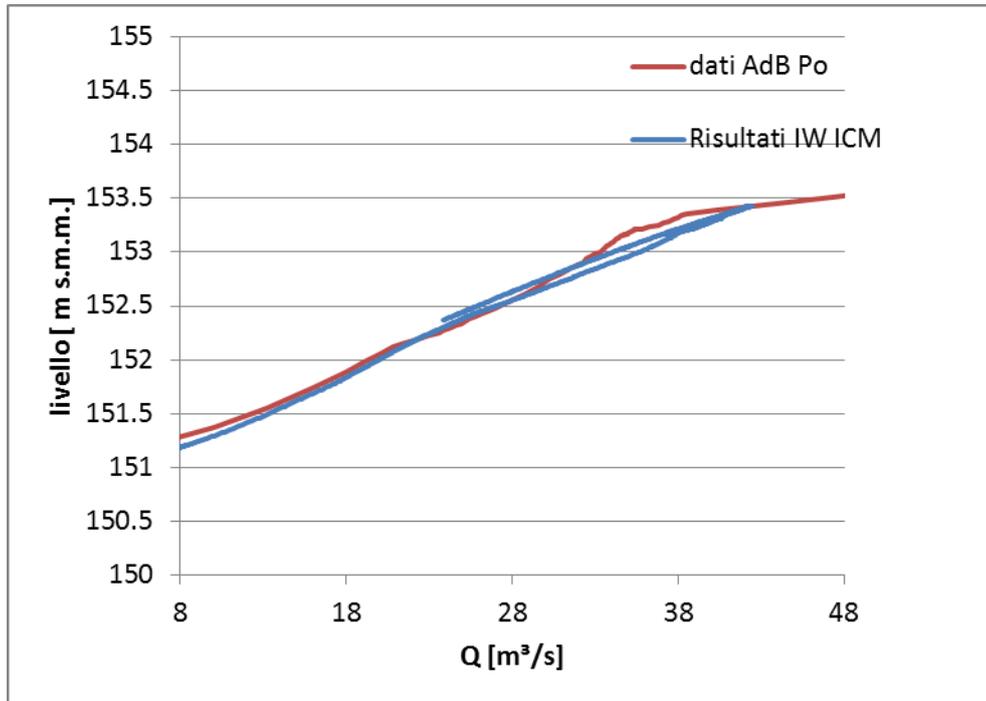


Figura 6.9 – Confronto tra l'andamento livelli e portate ottenuti con il modello 1D-2D in una sezione a monte del ponte ferroviario rispetto ai dati forniti dall'Autorità di Bacino.

## 6.2.2 Condizioni post-operam

Nelle condizioni post operam, come prima cosa si è optato per la scelta di un ponte con un impalcato quanto più ridotto possibile connesso all'innalzamento massimo della livelletta ferroviaria. La sistemazione idraulica è relativa alla sola parte geometrica dell'alveo nel tratto di sistemazione immediatamente a monte del ponte ferroviario esistente, con adozione di coefficienti di scabrezza di Manning specifici (0.022 – 0.025).

Il nuovo attraversamento ferroviario, a valle di tali accorgimenti, risulta un elemento strutturale non interferente con l'alveo.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

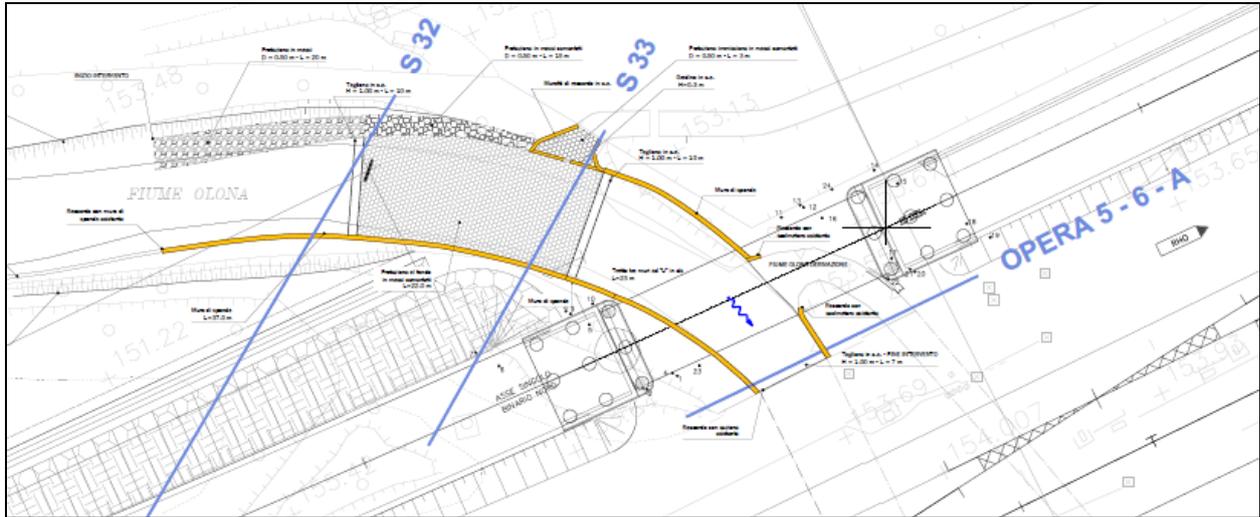


Figura 6.10 – Sistemazione idraulica dell'alveo

La sistemazione idraulica prevede un primo tratto, di lunghezza 20 m, caratterizzato da una protezione delle sponde in massi (Figura 6.11).

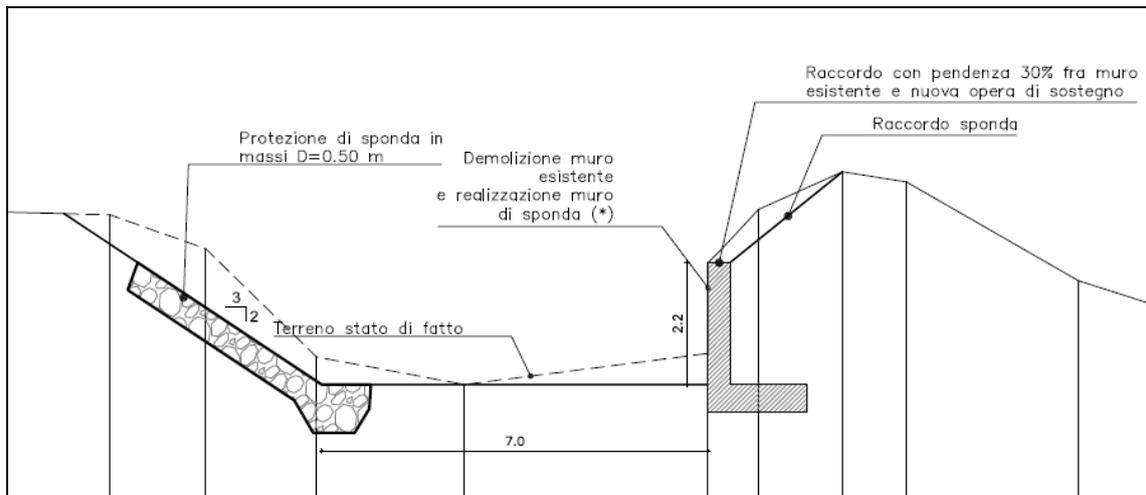


Figura 6.11 – Sistemazione idraulica dell'alveo – primo tratto

La sezione utilizzata per la riprofilatura ha una larghezza di 10 m che corrisponde alla dimensione massima che l'alveo può assumere immediatamente a monte dell'attraversamento ferroviario. La figura seguente riporta la sezione di progetto in corrispondenza del nuovo attraversamento ferroviario.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 53 di 88

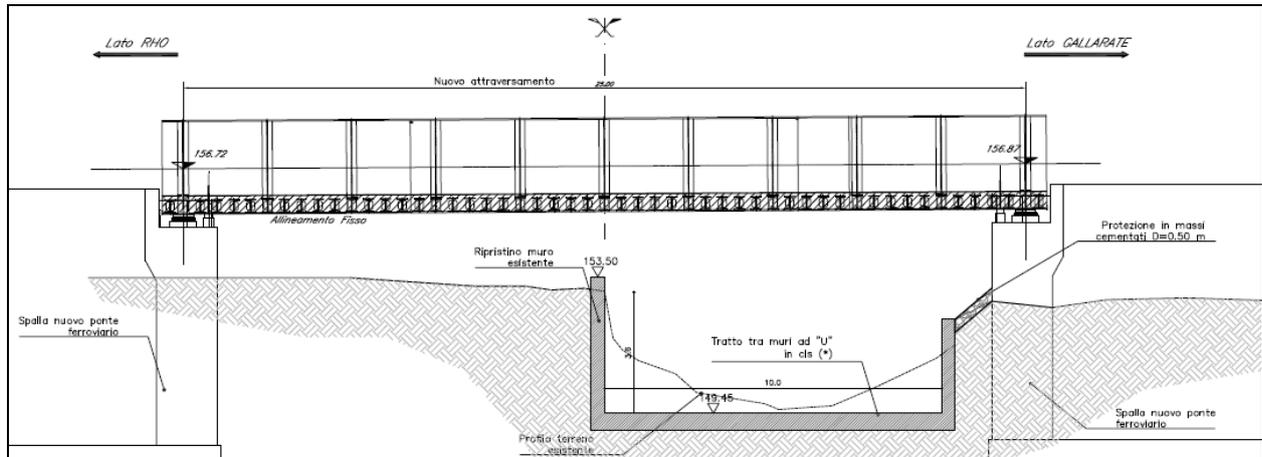


Figura 6.12 – Sistemazione idraulica dell'alveo – primo tratto

Per una dettagliata analisi della sistemazione idraulica prevista si rimanda agli elaborati MDL130D26PZID0002001A e MDL130D26PZID0002002A.

### 6.2.3 Risultati ottenuti

Il modello idraulico mono-bidimensionale determina dei risultati in linea con quanto atteso: in particolare nel tratto in esame gli eventi di piena considerati determinano aree allagabili estese. Non si riscontrano differenze significative in termini di estensione delle aree allagabili tra i diversi tempi di ritorno, soprattutto considerando l'orografia del territorio completamente pianeggiante e che il ponte ferroviario esistente va in pressione per portate legate a tempi di ritorno molto bassi e . La Figura 6.13 e la Figura 6.14 riportano rispettivamente l'estensione delle aree allagabili nello stato ante operam e post operam, per i diversi tempi di ritorno analizzati.

Tra quelli simulati, solo lo scenario "assetto transitorio" con tempo di ritorno di 100 anni determina un sensibile miglioramento in termini di estensione delle aree allagabili e tiranti idrici. La Figura 6.15 riporta il confronto tra l'estensione delle aree allagabili per TR100 anni nello stato post operam e nello stato con interventi di progetto (transitorio).



Figura 6.13 – Aree allagabili per TR50, 100, 200 anni nello stato ante operam.

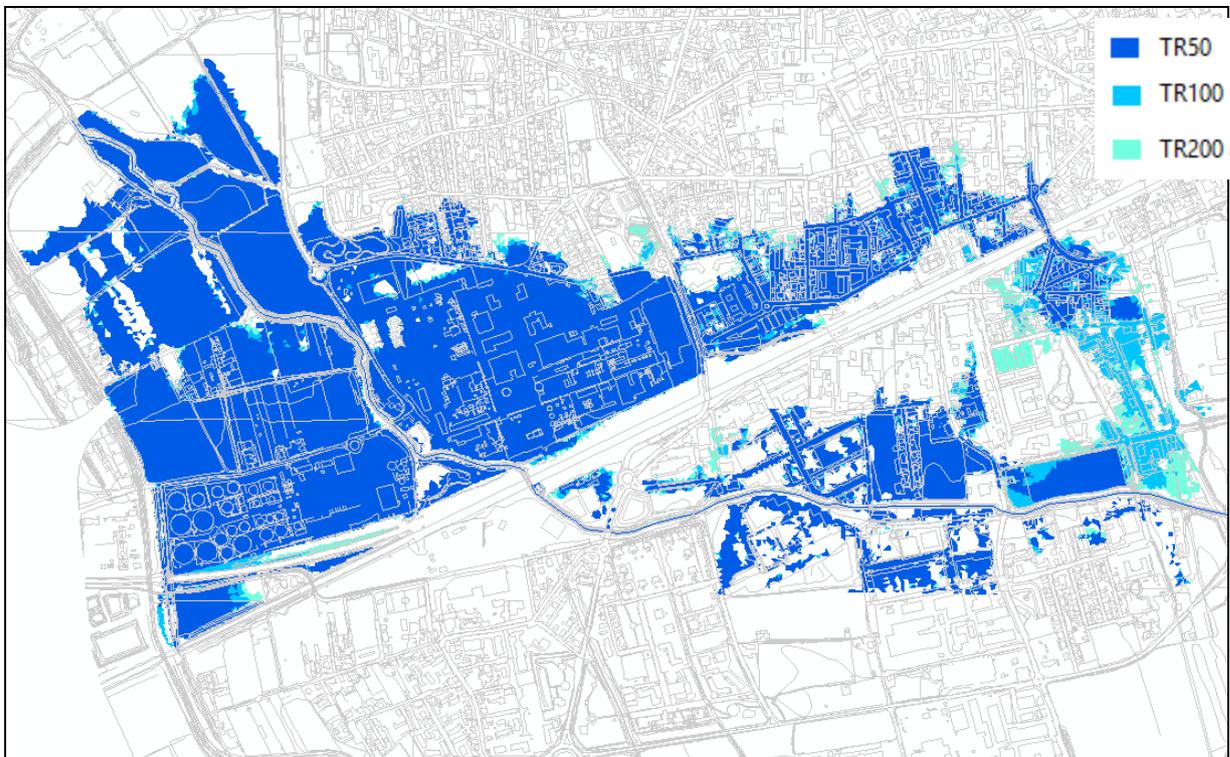
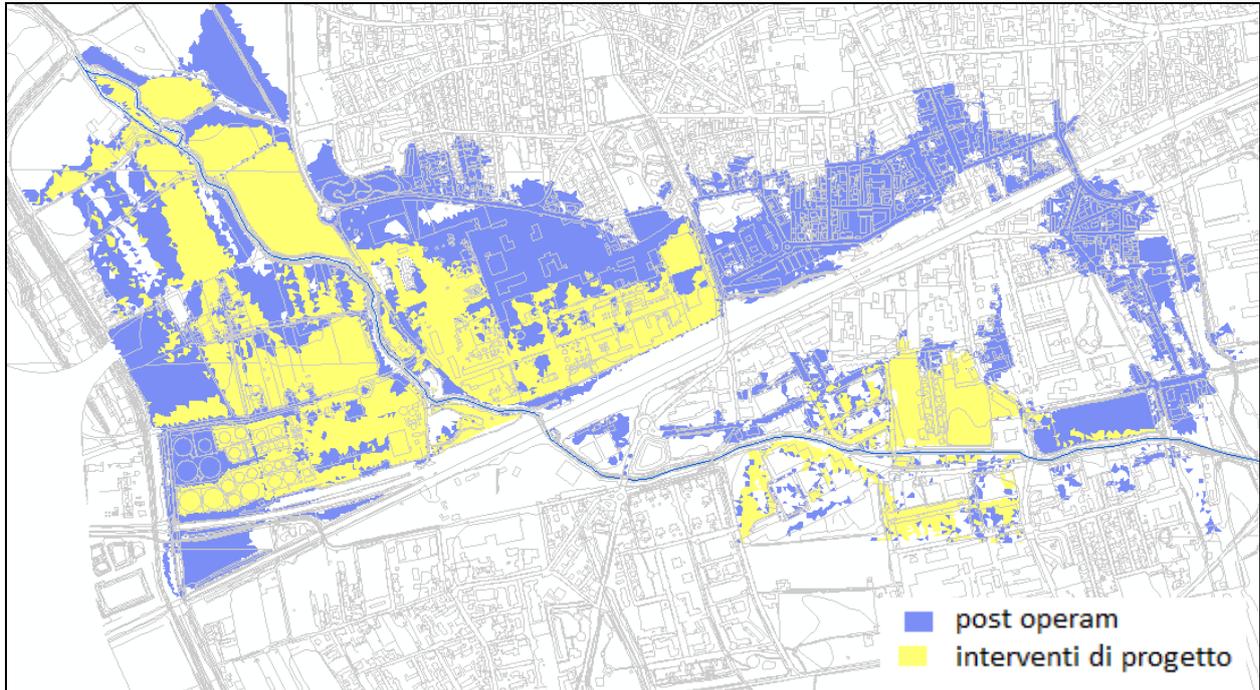


Figura 6.14 – Aree allagabili per TR50, 100, 200 anni nello stato post operam.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A



*Figura 6.15– Aree allagabili per TR100 anni nello stato post operam e con interventi di progetto (transitorio).*

Il nuovo attraversamento ferroviario nello stato post operam risulta essere “trasparente” alla piena: non si registrano differenze in termini di livelli calcolati immediatamente a monte in alveo e nella piana allagabile.

Le figure seguenti riportano i livelli simulati nello stato di fatto e di progetto in una sezione a monte del nuovo attraversamento ferroviario per TR200 anni (Figura 6.16), i livelli simulati nello stato di fatto e di progetto in una zona esterna all’alveo, in sinistra a monte del nuovo attraversamento ferroviario per TR200 anni (Figura 6.17) ed i livelli simulati nello stato di post operam per TR100 e TR 100 transitorio in una sezione a monte del nuovo attraversamento ferroviario (Figura 6.18).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 56 di 88

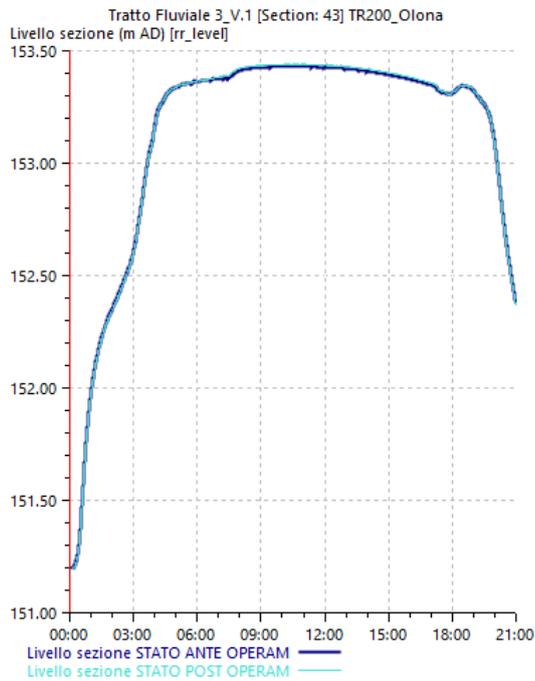


Figura 6.16 – Livelli simulati nello stato di fatto e di progetto in una sezione a monte del nuovo attraversamento ferroviario per TR200 anni

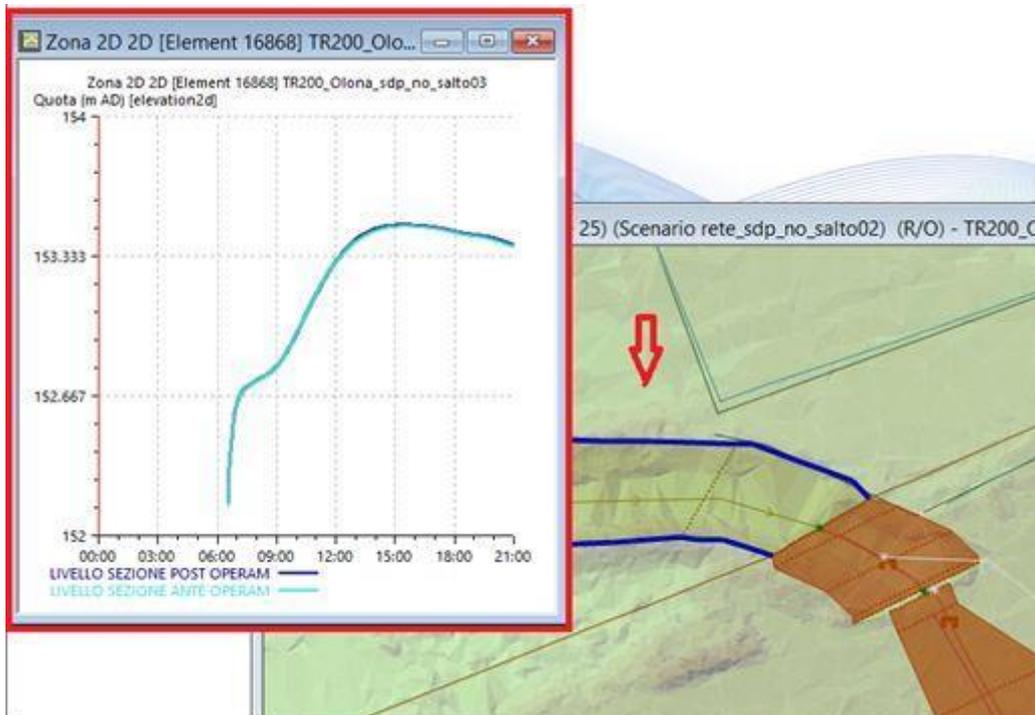


Figura 6.17 – Livelli simulati nello stato di fatto e di progetto in una zona esterna all'alveo, in sinistra a monte del nuovo attraversamento ferroviario per TR200 anni

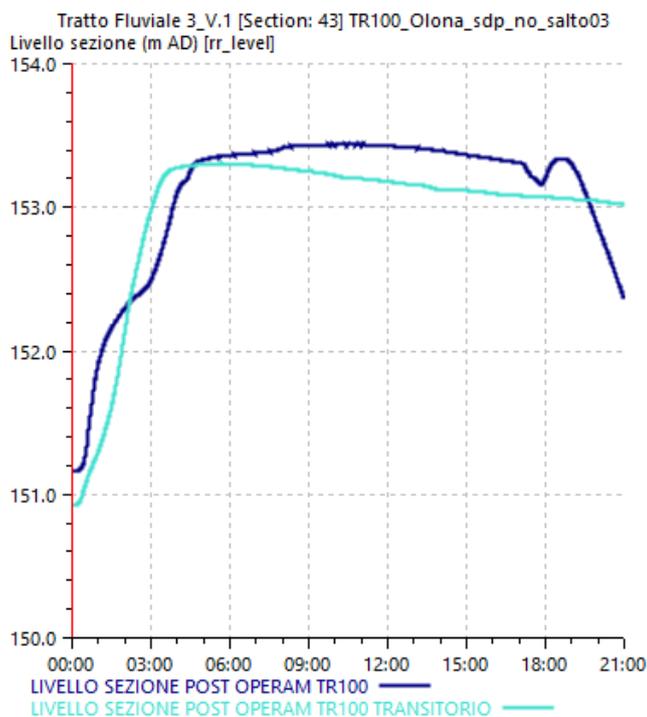


Figura 6.18 – Livelli simulati nello stato di post operam per TR100 e TR 100 transitorio in una sezione a monte del nuovo attraversamento ferroviario

La seguente tabella riporta i livelli calcolati per i diversi scenari analizzati.

Nome sez rilievo	Progr. da planim	talweg	TR50 ante operam	TR50 post operam	TR100 ante operam	TR100 post operam	TR100 transitorio	TR200 ante operam	TR200 post operam	differenza TR100 ante operam - transitorio
S1	0	153.76	156.41	156.41	156.46	156.46	155.97	156.48	156.48	0.49
S2	63.7	152.69	155.58	155.58	155.60	155.60	155.31	155.61	155.61	0.29
S3	103.9	152.84	155.42	155.42	155.43	155.43	155.18	155.44	155.44	0.26
S4	166.7	152.15	155.33	155.33	155.35	155.35	155.12	155.35	155.35	0.22
S5	192.3	152.08	155.39	155.39	155.40	155.40	155.16	155.41	155.41	0.24
S6	217.9	152.40	155.28	155.28	155.29	155.29	155.09	155.30	155.30	0.20
S7	244.1	151.27	155.30	155.30	155.31	155.31	155.07	155.32	155.32	0.25
opera 1	265.3	152.53	155.12	155.12	155.13	155.13	154.91	155.14	155.14	0.22
S8	322	151.23	155.17	155.17	155.17	155.17	154.98	155.18	155.18	0.19
S9	383.1	152.17	154.95	154.95	154.96	154.96	154.80	154.96	154.96	0.16
S10	439	151.90	154.84	154.84	154.85	154.85	154.72	154.85	154.85	0.13
S11	492.3	151.88	154.81	154.81	154.82	154.82	154.68	154.82	154.82	0.14
S12	566.6	151.80	154.65	154.65	154.65	154.65	154.53	154.65	154.65	0.12
S13	652.1	152.02	154.49	154.49	154.50	154.50	154.38	154.50	154.50	0.11
S14	716.6	151.30	154.28	154.28	154.28	154.28	154.18	154.29	154.29	0.10
S15	764.5	151.63	154.26	154.26	154.26	154.26	154.14	154.26	154.26	0.12
S16	814	151.80	153.99	153.99	154.00	154.00	153.87	154.00	154.00	0.13
S17	870	151.30	153.98	153.98	153.98	153.98	153.86	153.98	153.98	0.12
S18	952	151.86	153.60	153.60	153.61	153.61	153.49	153.61	153.61	0.12
S19	995.2	150.02	153.81	153.81	153.81	153.81	153.68	153.82	153.82	0.13
S20	1029.4	150.60	153.72	153.72	153.73	153.73	153.60	153.73	153.73	0.13

Nome sez rilievo	Progr. da planim	talweg	TR50 ante operam	TR50 post operam	TR100 ante operam	TR100 post operam	TR100 transitorio	TR200 ante operam	TR200 post operam	differenza TR100 ante operam - transitorio
S21	1079.8	150.47	153.69	153.69	153.70	153.70	153.57	153.70	153.70	0.13
S22	1107.8	150.38	153.66	153.66	153.67	153.67	153.55	153.67	153.67	0.12
S23	1135.5	150.35	153.65	153.65	153.65	153.65	153.53	153.65	153.65	0.12
opera 4	1160.3	150.30	153.61	153.61	153.62	153.62	153.50	153.62	153.62	0.12
S24	1208.3	150.34	153.59	153.59	153.59	153.59	153.48	153.59	153.59	0.11
S25	1250.3	150.25	153.54	153.54	153.55	153.55	153.42	153.55	153.55	0.13
S26	1270.7	150.18	153.54	153.54	153.55	153.55	153.43	153.55	153.55	0.12
S27	1287.3	150.15	153.50	153.50	153.51	153.51	153.39	153.51	153.51	0.12
S28	1328.9	150.06	153.51	153.51	153.51	153.51	153.39	153.51	153.51	0.12
S29	1377.4	150.12	153.47	153.47	153.48	153.48	153.37	153.48	153.48	0.11
S30	1430.4	150.13	153.44	153.44	153.45	153.45	153.33	153.45	153.45	0.13
S31	1446.7	149.49	153.47	153.47	153.47	153.47	153.35	153.48	153.48	0.13
S32	1486.2	149.95	153.42	153.42	153.43	153.43	153.31	153.43	153.43	0.13
S33	1505.3	149.42	153.45		153.46			153.46		
opera 5	1529.7	149.39	153.40		153.40			153.41		
S37	1597.1	149.41	153.16	153.16	153.16	153.16	153.07	153.16	153.16	0.09
S39	1634	149.67	153.09	153.09	153.10	153.10	153.01	153.10	153.10	0.09
S40	1658	149.59	153.08	153.08	153.08	153.08	152.99	153.08	153.08	0.09
S41	1688	149.87	152.97	152.97	152.97	152.97	152.88	152.97	152.97	0.09
S42	1716.3	149.17	153.02	153.02	153.02	153.02	152.94	153.03	153.03	0.09
S43	1747.4	148.99	152.94	152.94	152.95	152.95	152.86	152.95	152.95	0.09
opera 7	1777.4	149.77	152.91	152.91	152.92	152.92	152.83	152.92	152.92	0.09
S44	1812.8	149.44	152.73	152.73	152.73	152.73	152.66	152.73	152.73	0.07
S45	1858.4	149.76	152.62	152.62	152.62	152.62	152.56	152.62	152.62	0.07
S46	1899.9	149.58	152.61	152.61	152.61	152.61	152.54	152.61	152.61	0.07
S47	1952.9	149.66	152.55	152.55	152.55	152.55	152.49	152.55	152.55	0.06
opera 8	1994.2	149.84	152.45	152.45	152.45	152.45	152.39	152.45	152.45	0.06
S48	2035.3	149.30	152.48	152.48	152.48	152.48	152.42	152.48	152.48	0.06
S49	2092.8	149.28	152.38	152.38	152.39	152.39	152.33	152.39	152.39	0.06
S50	2142.1	149.05	152.35	152.35	152.35	152.35	152.30	152.36	152.36	0.06
S51	2192.8	148.96	152.32	152.32	152.32	152.32	152.27	152.32	152.32	0.05
S52	2242.7	148.77	152.32	152.32	152.32	152.32	152.27	152.32	152.32	0.05
S53	2296.6	148.89	152.23	152.23	152.24	152.24	152.19	152.24	152.24	0.05
S54	2348.4	148.78	152.24	152.24	152.24	152.24	152.19	152.24	152.24	0.05
S55	2391	148.89	152.16	152.16	152.17	152.17	152.12	152.17	152.17	0.05
opera 9	2431.7	148.84	152.11	152.11	152.11	152.11	152.06	152.11	152.11	0.05
S56	2466.1	148.69	151.93	151.93	151.93	151.93	151.89	151.94	151.94	0.04
S57	2519.5	148.66	151.87	151.87	151.87	151.87	151.82	151.87	151.87	0.04
S58	2566.6	148.66	151.85	151.85	151.85	151.85	151.81	151.85	151.85	0.04

Tabella 6.1 – Livelli simulati per i diversi scenari analizzati

### 6.3 VERIFICA DEL FRANCO

La Circolare Esplicativa del 2 Febbraio 2009 n°617 prevede per gli intradossi dei ponti di nuova realizzazione un franco idraulico di almeno 1.5-2.0 m sul livello idrico associato ad una portata di tempo di ritorno di almeno 200 anni.

Nella Figura 6.19 sono indicati i livelli idrici corrispondenti alle portate considerate e

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 59 di 88

calcolati immediatamente a monte della sezione occupata dal nuovo ponte ferroviario, nella configurazione ante e post operam.

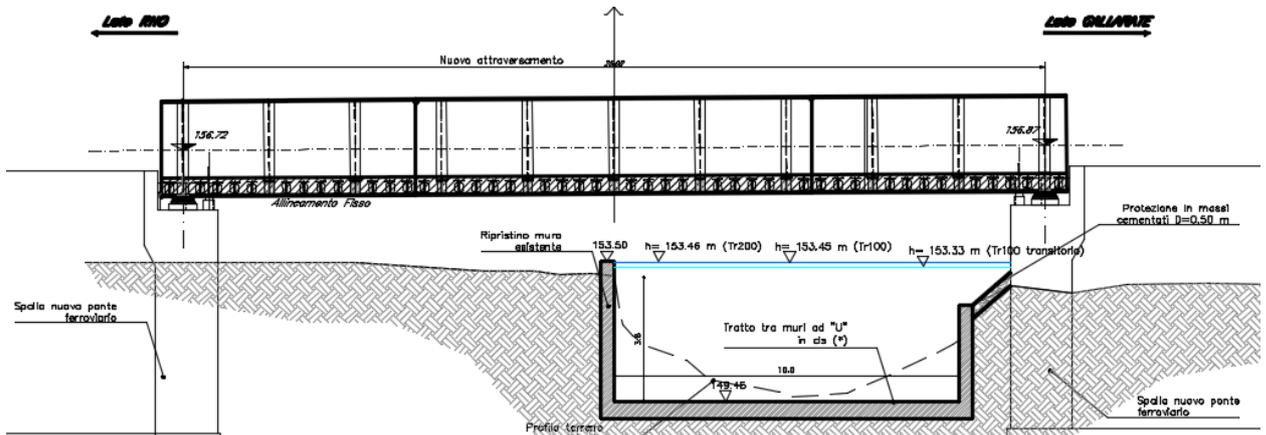


Figura 6.19: Livelli idrici immediatamente a monte del ponte – ante e post operam.

Nella tabella seguente sono riportati i livelli idrici calcolati immediatamente a monte del ponte, i livelli energetici ed il valore del franco misurato rispetto all'intradosso per tutti i tempi di ritorno simulati: il franco del livello idrico rispetto alla quota di intradosso è sempre maggiore di 1.5 m e risulta pertanto garantito.

	ANTE OPERAM			POST OPERAM			transitorio
	TR50 ante operam	TR100 ante operam	TR200 ante operam	TR50 post operam	TR100 post operam	TR200 post operam	TR100
LIVELLO IDRICO [m s.m.m.]	153.45	153.45	153.46	153.45	153.45	153.46	153.33
LIVELLO ENERGETICO [m s.m.m.]	153.49	153.50	153.50	153.50	153.50	153.50	153.37
INTRADOSSO PONTE FERROVIARIO [m s.m.m.]	155.36						
FRANCO [m]	1.91	1.91	1.90	1.91	1.91	1.90	2.03
DIFFERENZA RISPETTO ALL'ANTE OPERAM [m]	-	-	-	0	0	0	+0.12

Tabella 6.II – Livelli idrici a monte del nuovo ponte ferroviario e franco idraulico

Dai risultati emerge come nella configurazione post operam il nuovo attraversamento non modifichi la situazione attuale: l'elemento condizionante i livelli e le dinamiche idrauliche risulta essere in tutti gli scenari il ponte esistente.

Il nuovo ponte, come richiesto da normativa, garantisce un franco idraulico minimo di 1.90 m sulle attuali condizioni di deflusso per una piena con tempo di ritorno di 200

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 60 di 88

anni.

Lo scenario significativamente diverso è quello che prevede la realizzazione degli interventi di laminazione a monte del tratto in esame (“transitorio”), che determinano minori aree esondabili e minori tiranti in corrispondenza degli attraversamenti.

Dai dati a disposizione tale scenario può essere studiato solo con un tempo di ritorno di 100 anni. Viste le similitudini tra i risultati ottenuti per i vari tempi di ritorno si può con tranquillità affermare che, una volta realizzati gli interventi previsti nell’assetto transitorio, il franco idraulico al di sotto del nuovo ponte di progetto non potrà che aumentare rispetto a quello calcolato nell’attuale configurazione.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 61 di 88	

## 7 CONCLUSIONI

La presente relazione ha descritto lo studio idraulico riguardante il nuovo manufatto di attraversamento ferroviario sul fiume Olona, nell'ambito del progetto del potenziamento della tratta ferroviaria Rho – Gallarate, nella revisione conseguente il parere 98/2014 espresso dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Il nuovo ponte in progetto, necessario per la realizzazione di un nuovo Singolo binario, è disposto immediatamente a monte dell'attuale attraversamento ferroviario, in particolare la distanza tra l'asse del binario del nuovo ponte in progetto e l'ingombro dell'opera esistente è di 8,75 m.

L'attraversamento attuale rappresenta uno dei punti critici dal punto di vista della sicurezza idraulica che si incontrano lungo il fiume Olona. La sezione utile al deflusso è alquanto esigua rispetto alle portate di piena e la quota di intradosso del ponte non presenta elevati franchi di sicurezza nemmeno nelle condizioni idrologiche ordinarie.

Poco a valle dell'attraversamento il fiume Olona si immette entro una tombinatura di molti chilometri, per riemergere solamente a valle di Milano. La stesa rappresenta un'altra delle singolarità presenti lungo il corso d'acqua e, come per il ponte ferroviario esistente, risulta dimensionata per una portata diversa e di molto inferiore a quella idrologica che si avrebbe nella sezione di chiusura del bacino. Naturalmente ogni singolarità produce effetti differenti, infatti se il ponte ferroviario risulta uno dei punti più critici per la sicurezza idraulica questo non è vero per la tombinatura, in cui, invece, le condizioni al contorno sono tali da garantire il corretto funzionamento dell'opera.

Tutti gli interventi necessari e previsti dai vari organi competenti, a tal proposito, al fine di restituire il più possibile al fiume gli spazi che naturalmente gli competono, garantendo al contempo il massimo grado di sicurezza possibile agli insediamenti urbani attualmente esistenti in fregio al corso d'acqua, non prevedono l'adeguamento di tutte le interferenze esistenti quanto invece la realizzazione di vasche di laminazione per risolvere le problematiche sopra esposte.

Sulla base delle analisi idrologiche ed idrauliche fornite dall'Autorità di Bacino del Fiume Po, derivanti da studi pregressi, e del rilievo topografico svolto a Marzo 2017 sono stati implementati, per la verifica del nuovo ponte in progetto, un modello

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 62 di 88

matematico monodimensionale (HEC RAS) ed un modello mono-bidimensionale (InfoWorks ICM) che ha permesso anche l'analisi degli allagamenti nelle zone perifluviali, per i diversi scenari ante e post operam.

Lo studio idraulico effettuato mediante applicazione del modello di calcolo mono-bidimensionale ha confermato la situazione di criticità in termini di sicurezza idraulica dell'area di studio. È emerso che le piene studiate, nei differenti scenari, determinano allagamenti simili per estensione e tiranti; tale comportamento è dovuto al fatto che il ponte ferroviario esistente va in pressione con la portata associata ad un tempo di ritorno di 10 anni. Lo scenario che prevede la realizzazione di interventi con laminazione delle piene a monte di Rho (scenario transitorio), a differenza degli scenari nelle condizioni attuali, produce effetti positivi ritenuti significativi in merito alla riduzione delle aree di esondazione.

I risultati modellistici hanno consentito di verificare il corretto dimensionamento delle nuove opere e la loro compatibilità idraulica: l'intradosso dell'impalcato di progetto risulta ampiamente verificato secondo le normative e i regolamenti vigenti.

Data la particolare posizione nel contesto urbano, le problematiche del corso d'acqua in termini di esondazioni e la necessità di limitare l'incremento di quota del piano ferro rispetto alle precedenti revisioni progettuali e rispetto al ponte ferroviario esistente, al fine di rispettare i limiti di normativa definiti dal DM 2008 in merito al franco idraulico, si è scelto di optare per un ponte a via inferiore con travi portanti di bordo estradossate che consente di limitare lo spessore dell'impalcato ad 1,36 m. Tale struttura permette di scavalcare una luce netta tra gli allineamenti degli appoggi di 25 m, garantendo così la piena "trasparenza" del nuovo attraversamento ferroviario nello stato post operam.

Dai risultati delle simulazioni relative allo stato post-operam emerge che il nuovo attraversamento ferroviario risulta "trasparente" alla piena di progetto, consentendo il transito delle portate attuali di riferimento con franchi al di sotto dell'opera ferroviaria che soddisfano le indicazioni di normativa (franco  $\geq 1,50$  m).

Nello scenario futuro, in cui venissero realizzati solo gli interventi prioritari, "assetto transitorio", le aree esondabili si ridurrebbero sostanzialmente comportando minori tiranti in corrispondenza degli attraversamenti esistenti e, di conseguenza, il franco idraulico al di sotto dell'opera in progetto potrebbe solo aumentare.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 63 di 88	

## ALLEGATO A. MODELLO MATEMATICO 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.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 64 di 88

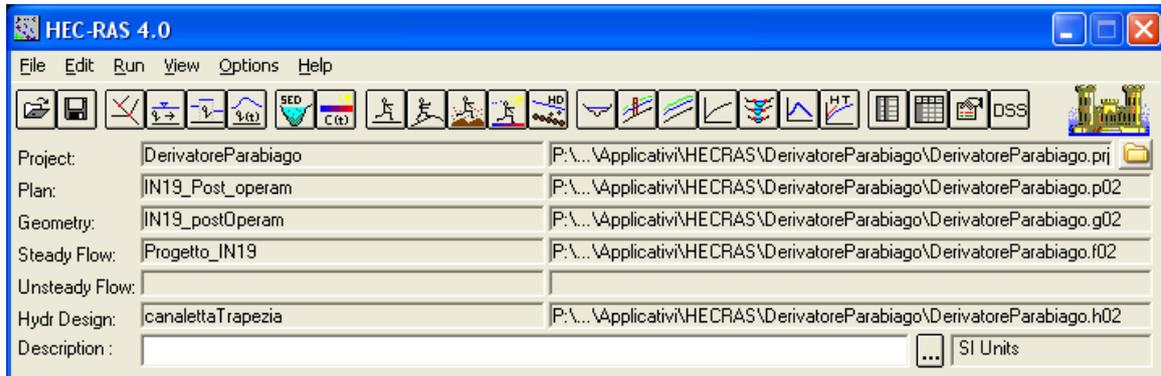


Figura A.7.1 - Finestra principale del modello HEC-RAS 4.0

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 velocità;

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 65 di 88

- 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.

### 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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 66 di 88	

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:

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 67 di 88

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

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  $V^2/2g$ :

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 68 di 88	

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

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:

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 69 di 88

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

Ponendo quindi:

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

si ha che:

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

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 70 di 88

- 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 consente 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:

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

o in altri termini:

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 71 di 88

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

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:

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

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.

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

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 72 di 88

**Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona**

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

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

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

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

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 73 di 88

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  $h_e$ ;
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.

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 74 di 88	

#### **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.

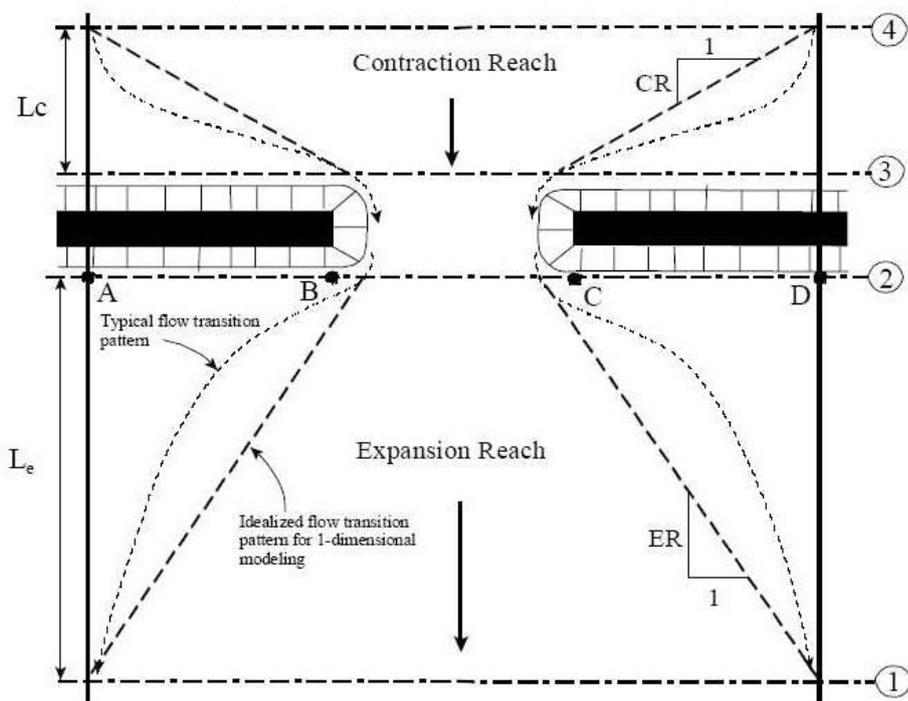


Figura A.7.2 – Posizionamento delle sezioni idrauliche per il calcolo dei ponti in Hec-Ras.

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 76 di 88

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:

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

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:

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

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

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

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:

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 77 di 88	

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 78 di 88	

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 79 di 88

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

$W_x$  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 soprizzo 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:

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

dove:

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

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 80 di 88	

**Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona**

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

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 81 di 88

“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.

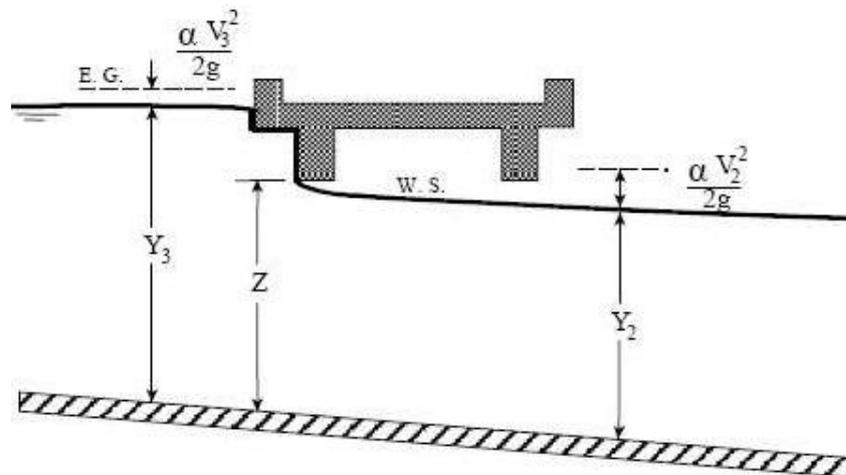
### **Calcolo del profilo in condizioni di high flow**

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:

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



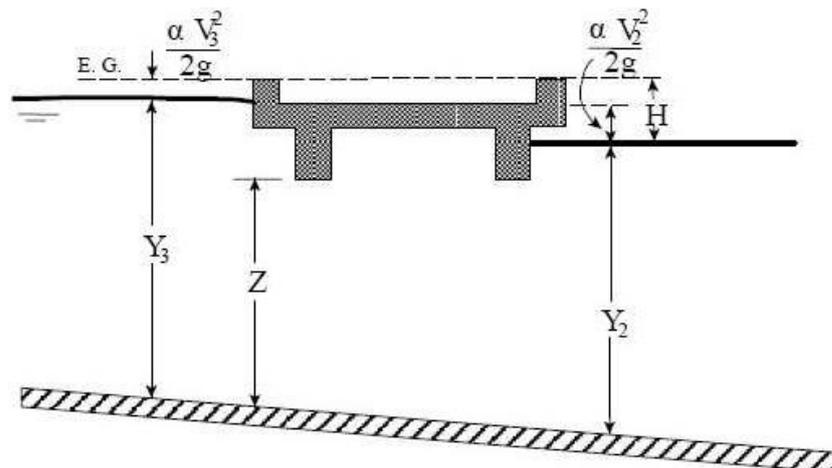
Il coefficiente di deflusso  $C_D$  può essere definito dall'utente o automaticamente "scelto" dal programma dato il rapporto  $Y_3/Z$  sulla base di dati sperimentali.

#### 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.



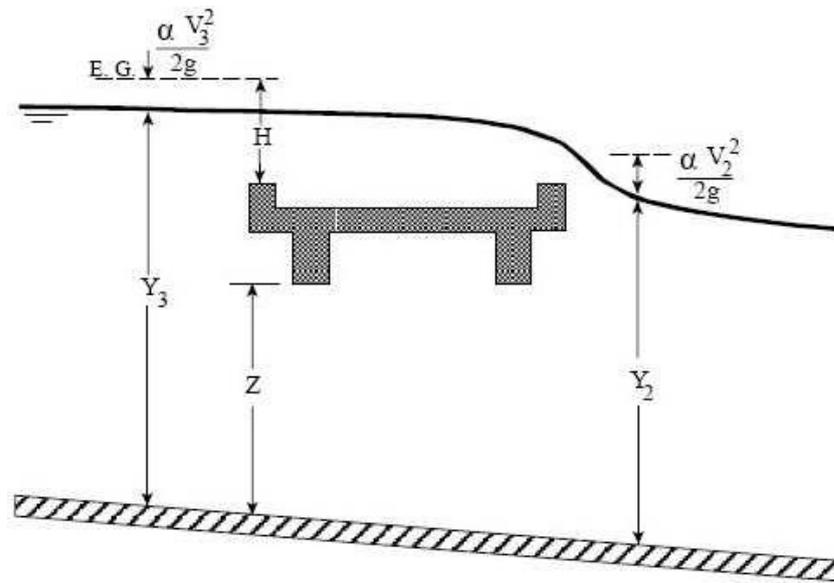
#### Deflusso a stramazzo

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

del ponte, 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.



	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 84 di 88

## ALLEGATO B. MODELLO MATEMATICO INFOWORKS ICM

### B.1 Punti di forza dell'applicativo software

I punti di forza principali dell'applicativo derivano dalla sua ampissima gamma di applicazione che ne consente l'utilizzo di qualsiasi situazione reale senza bisogno di ricorrere ad artifici o semplificazioni del problema. L'interfaccia utente, semplice e completo, la velocità di calcolo e la robustezza dell'approccio numerico completano il prodotto rendendolo facilmente fruibile ai tecnici che operano nel settore dell'idraulica.

### B.2 Modelli idrologici disponibili

Pur trattandosi di un modello idraulico, InfoWorks ICM dispone di una serie modelli di trasformazione afflusso-deflussi per connettere una sezione di deflusso del reticolo di drenaggio, a un bacino idrografico che produce la portata di alimentazione in risposta ad un evento meteorico. E' quindi possibile sollecitare il modello geometrico con diverse condizioni al contorno tra cui anche degli opportuni ietogrammi di pioggia incidenti in diversi sottobacini. A scelta l'utente potrà scegliere tra questi modelli idrologici:

- Formula Razionale
- Modello CN (SCS)
- Modello Green-Ampt
- Modello Horton
- Modello New UK
- Modello dell'Infiltrazione costante
- Modello di Horner

Si possono anche inserire diversi modelli di corrivazione e di computazione delle perdite iniziali.

### B.3 Approccio numerico alla componente 1D

Il moto idraulico all'interno degli elementi monodimensionali che lavorano a pelo libero (sia le tratte fluviali aperte o tubazioni) vengono risolte con l'integrazione delle equazioni di De Saint Venant (conservazione del momento e della massa).

Le equazioni sono le seguenti:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE					
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0$$

dove:

- A area bagnata del condotto;
- Q portata;
- x distanza lungo l'asse del condotto;
- t tempo;
- g costante gravitazionale;
- H carico idraulico totale dato da z+h;
- z quota dello scorrimento;
- h livello idrico;
- Sf cadente piezometrica.

In particolare, la prima è l'equazione di continuità in moto vario in assenza di afflussi e deflussi laterali, la seconda è l'equazione del momento della quantità di moto; quest'ultima può essere scritta in più forme, in funzione della scelta delle variabili dipendenti. La cadente piezometrica viene computata con varie possibili metodologie (a scelta dell'utente): in InfoWorks sono infatti disponibili le equazioni di Colebrook-White, Manning e Strickler.

Per poter essere integrate queste equazioni devono essere opportunamente semplificate e linearizzate in modo tale che il sistema di equazioni possa essere risolto con la teoria delle matrici. Lo schema di linearizzazione usato da InfoWorks CS è quello dei 4 punti di Priessmann mentre il risolutore adottato è quello di Newton-Raphson.

Le equazioni di cui sopra sono valide fino a quando il condotto non entra in pressione, per permettere a InfoWorks di simulare anche situazioni di condotte in pressione (senza problemi nella transizione da uno stato all'altro) il motore di calcolo adotta la tecnica dello slot per il quale si ipotizza la presenza di una piccola fessura alla sommità della condotta e fino al piano campagna. Così facendo il motore di calcolo non incontra nessuna discontinuità nella transizione da moto da gravità a quello in pressione (per tubi in cui invece permane costantemente il moto in pressione, come le condotte di mandate presenti nel modello, è possibile utilizzare un sistema di equazioni più appropriato che elimina l'artificio dello slot).

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	<b>Relazione di compatibilità idraulica – Fiume Olona</b>	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 86 di 88

L'applicabilità di questo metodo di soluzione è stato testato in centinaia di studi e applicazioni anche con riscontri di misure idrometriche ottenuti su dei bacini sperimentali.

Ci sono alcune limitazioni sull'utilizzo di questo approccio sono:

- i risultati sono semplificati per elementi molto pendenti e per le quali comunque InfoWorks produce dei risultati comunque vicini alla realtà;
- il risalto idraulico (ovvero quella discontinuità che si nota nei profili di rigurgito dove un tubo molto pendente incontra un tubo a bassa pendenza per cui l'acqua forma un vero e proprio sovrizzo improvviso) non viene rappresentato in modo preciso ma il passaggio da corrente veloce a lenta viene computato su una certa distanza (qualche metro a seconda della geometria della situazione reale).

Si noti che la metodologia di calcolo a moto vario è in grado di tener conto anche dei volumi in gioco e quindi di tener conto delle attenuazioni dell'onda di piena quando questa riempie dei volumi disponibili in alveo o in vere e proprie vasche di espansione opportunamente rappresentate nel modello.

#### B.4 Approccio numerico alla componente 2D

Il modello usato per la rappresentazione matematica del flusso 2D è basato sull'equazione dell'acqua superficiale, relativa cioè all'altezza media che si ricava dalle equazioni di Navier – Stokes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2 + gh^2/2) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + gh^2/2) \\ = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D} \end{aligned} \quad (3)$$

dove:

- h è l'altezza dell'acqua;
- u e v sono rispettivamente le velocità nelle direzioni x e y;
- S<sub>0,x</sub> e S<sub>0,y</sub> sono rispettivamente le pendenze dell'alveo nelle direzioni x e y;
- S<sub>f,x</sub> e S<sub>f,y</sub> sono rispettivamente gli attriti nelle direzioni x e y;

	POTENZIAMENTO LINEA RHO - ARONA TRATTA RHO – GALLARATE						
	PROGETTO MDL1	LOTTO 30	CODIFICA D 26	DOCUMENTO RI ID0002 001	REV. A	FOGLIO 87 di 88	

- $q1D$  è la portata per unità di area;
- $u1D$  e  $v1D$  sono rispettivamente le componenti di velocità della portata  $q1D$  nelle direzioni  $x$  e  $y$ .

Questa formulazione conservativa dell'equazione dell'acqua superficiale è discretizzata utilizzando un sistema di primo ordine esplicito del volume finito.

La tecnica di frazionamento del flusso assicura la proprietà del buon equilibrio bilanciando la pendenza con la pressione, termini a riposo.

La gestione della cella bagnata ed asciutta è eseguita utilizzando come criterio una profondità di soglia per considerare che una cella è bagnata, e la velocità è impostata a zero se la profondità è sotto il valore di soglia. Questo evita la creazione di elevate velocità artificiali in aree bagnate/asciutte. Il valore di default per questa profondità di soglia è 1 mm.

Questo algoritmo può essere utilizzato teoricamente sia con maglie strutturate (rettangolari) che non strutturate (triangolari) ed è adatto per rappresentare flussi rapidamente variabili, nonché correnti veloci e lente. In InfoWorks si utilizzano le maglie non strutturate perché sono molto più flessibile e di facile utilizzo quando si vogliono rappresentare forme e ostacoli complessi presenti nel dominio.

### **B.5 Produzione della magliatura 2D**

All'interno del software sono presenti tutti gli strumenti necessari per costruire la magliatura dei domini 2D da simulare. Si possono prevedere diversi gradi di dettaglio per varie zone con opportuni raffinamenti del dominio, impostare diverse zone di scabrezza, fissare delle breaklines, definire ostacoli poligonali e lineari (edifici, muri, ecc.). Il processo di magliatura tiene conto di questi vincoli e, se lo si desidera, è in grado di produrre una magliatura dipendente dalla conformazione morfologica del terreno. Laddove il terreno risulta più pendente viene infittita la maglia per assicurarsi che i triangoli non abbiano i vertici con differenze di quota superiori ad un termine fissato dall'utente.

### **B.6 Collegamento 1D-2D**

Il modello di simulazione consente un immediato collegamento di diverse componenti di modello modo e bidimensionale. Si possono utilizzare per esempi:

- linee spondali: rappresentano un confine ideale tra l'alveo inciso modellato con

