

MILANO

PROGETTO VIE D'ACQUA ANELLO VERDE-AZZURRO

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE IDRAULICA

EXPO 2015 S.p.A

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:
ing. CARLO CHIESA

COORDINAMENTO:
arch. Anna Rossi

SUPPORTO TECNICO:
arch. Daniele William Re

EST TICINO VILLORESI

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:
dott. ROBERTO COPPOLA

COLLABORATORI PROGETTAZIONE:
ing. Andrea Loda
ing. Marcello Paba
geom. Giovanni Maurizio Motti

ASPETTI PAESAGGISTICI:
arch. Francesco Occhiuto
RAPPORTI ISTITUZIONALI:
arch. Patrizia Borghi

PROGETTISTA E RESPONSABILE
INTEGRAZIONE SPECIALISTICA:
ing. STEFANO BURCHIELLI



ATTIVITA' TECNICO-SPECIALISTICHE:



POLINOMIA srl
ingegneria dei trasporti e
matematica applicata
Via Poerio 41 - 20129 Milano
telefono 02.20.40.49.42
fax 02.29.40.87.35

Alfredo Drufuca, Mauro Cattaneo, Marco Engel,
Giovanna Longhi, Valerio Testa, Massimo Bianchi,
Alessandra Bettina, Chiara Gruppo, Luigi Torriani.



DIZETA INGEGNERIA S.r.l.
Via Bassini, 19 - 20133 MILANO Tel. 02-70600125
server@dizetaingegneria.it Fax 02-70600014
AMMINISTRATORE UNICO:
dott. ing. FULVIO BERNABEI

ELABORATO N.

2.3

SCALA

DATA

05.08.2013

CODICE PROGETTO EXPO 2015		NOME FILE Doc_2.3 Relazione Idraulica	REDATTO DIZETA	CONTROLLATO BURCHIELLI	APPROVATO COPPOLA
REVISIONE	DATA	DESCRIZIONE MODIFICA	REDATTO	CONTROLLATO	APPROVATO

Est Ticino Villoresi

Consorzio di Bonifica

AREA DI PROGETTO EXPO 2015 - Via L. Ariosto, 30 - 20145 Milano - tel 02/48561301 - fax 02/48013031 - www.etvilloresi.it - expo2015@etvilloresi.it





INDICE

1. PREMESSA.....	1
2. CANALE VILLORESI: VERIFICHE IDRAULICHE	3
2.1 COSTRUZIONE DELLA GEOMETRIA PER LA CONFIGURAZIONE DI STATO DI FATTO	5
2.2 PORTATE UTILIZZATE E CONDIZIONI AL CONTORNO	9
2.3 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO	10
2.4 ANALISI DEI RISULTATI.....	11
3. NAVIGLIO GRANDE: DESCRIZIONE DEL REGIME IDRAULICO	14
3.1 TRACCIATO.....	14
3.2 PENDENZA E SEZIONE.....	15
3.3 RIVESTIMENTO	16
3.4 SCARICATORI	17
3.5 PORTATE DERIVATE E IMMESSE NEL NAVIGLIO	17
3.6 DERIVAZIONI DAL NAVIGLIO	19
3.7 VALUTAZIONE DELLE PERDITE	20
3.8 TABELLA DELLE PORTATE DI CONCESSIONE AGGIORNATA AL 2009	20
APPENDICE A – IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS	24



1. PREMESSA

La presente relazione riporta le elaborazioni idrauliche svolte nell'ambito del progetto dell'Anello Verde Azzurro (AVA) che si inquadra nel programma degli interventi per le vie d'acqua presentato al Consiglio di Amministrazione di EXPO nel febbraio 2012.

Il programma contempla un complesso di azioni rivolte a dare continuità fisica e fruitiva al percorso di passeggiata attestato sulle sponde del canale principale Villoresi, del Naviglio Grande e del nuovo deviatore "vie d'acqua EXPO", garantendo la percorribilità a piedi e in bicicletta e migliorando la sicurezza e la qualità del circuito di oltre 130 Km di sviluppo in grado di connettere il sito di EXPO con le sponde del Ticino.

Il progetto AVA riguarda gli interventi da eseguire lungo il Canale principale Villoresi ed il Naviglio Grande, escludendo il tratto corrispondente alle nuove vie d'acqua EXPO, oggetto di progettazione distinta e separata dalla presente.

Per quanto riguarda il **Canale Villoresi** il progetto è finalizzato a migliorare la percorribilità della strada alzaia, intervenendo sul fondo stradale, sulle intersezioni con la viabilità veicolare ed in generale sui tratti nei quali la continuità è interrotta o compromessa. Inoltre, al fine di valorizzare la presenza dell'acqua e del manufatto idraulico, che costituisce la base stessa della costituzione dell'Anello, il progetto prevede anche la sistemazione di alcune piazzole di sosta in corrispondenza di derivazioni dal canale principale.

All'interno della presente relazione il capitolo 2 descrive le verifiche idrauliche condotte per i nodi 1 e 3 che comportano dei restringimenti della sezione attuale del canale.



Per quanto riguarda il **Naviglio Grande** il progetto è finalizzato anzitutto alla salvaguardia della stabilità delle sponde, in più punti ammalorate o rovinate, ed a risolvere i residui problemi di continuità del percorso fruttivo lungo l'alzaia, ormai da tempo oggetto di una frequentazione consolidata e intensa.

All'interno della presente relazione il capitolo 3 è dedicato alla descrizione della geometria del canale e del regime idraulico dello stesso. Le informazioni sono state recuperate dal "MASTER PLAN NAVIGLI - Competenza 1 "Bilancio idrico", prodotta dal prof. Claudio Gandolfi (Università degli Studi di Milano) - anno 2004 e integrate con i dati delle portate di concessione forniti dal Consorzio Villorezi.



2. CANALE VILLORESI: VERIFICHE IDRAULICHE

Per quanto riguarda il Canale Villoresi il progetto è finalizzato a migliorare la percorribilità della strada alzaia, intervenendo sul fondo stradale, sulle intersezioni con la viabilità veicolare ed in generale sui tratti nei quali la continuità è interrotta o compromessa.

Tuttavia gli interventi relativi ai **nodi N1 e N3** interessano anche il canale, poiché comportano un lieve restringimento della sezione idraulica.

Nodo 1 - Comune di Lonate Pozzolo: attraversamento della SS 527

Poco più a sud di Tornavento (frazione del Comune di Lonate Pozzolo), il percorso fruttivo interseca la Strada Statale 527, nel punto in cui questa descrive un'ampia curva in corrispondenza del declivio della costa del Ticino.

Il progetto prevede la realizzazione di un sottopasso della statale, raccordando le alzaie a monte e a valle del ponte con un nuovo tratto di percorso, ricavato occupando parte della profondità della sponda del canale. (figura 2.1)

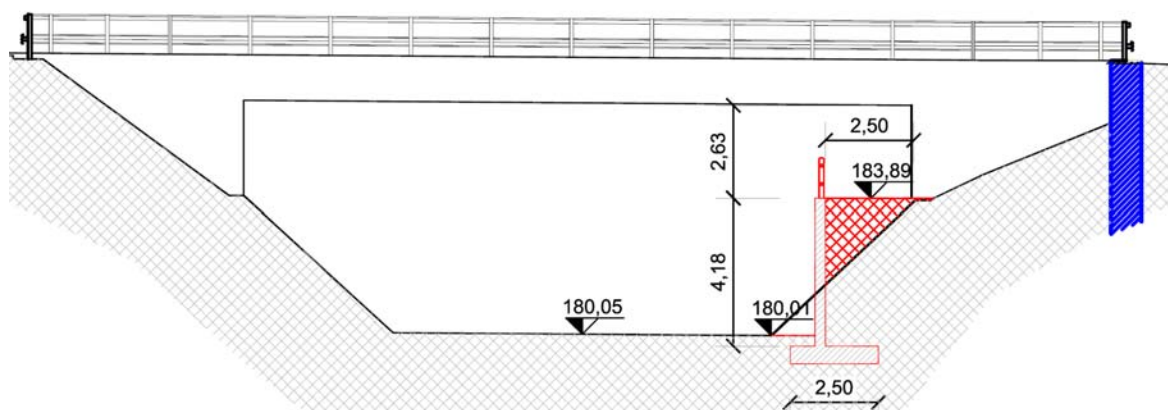


Figura 2.1: passaggio del percorso fruttivo al di sotto della statale 527 (Nodo 1)



N3 - Parabiago: attraversamento della ferrovia e della SP 109

All'interno dell'agglomerato urbano di Parabiago il percorso fruitivo, sviluppato lungo l'alzaia in sponda destra, in corrispondenza del tratto di canale compreso fra viale Lombardia e via Aristotele, incontra la ferrovia che costituisce una barriera invalicabile. Inoltre l'alzaia rimane inaccessibile anche per un tratto di circa 150 m a valle del ponte della ferrovia, fino alla via Papini.

Il progetto prevede la realizzazione di un passaggio sotto il ponte ferroviario, raccordando le alzaie a monte e a valle del ponte, con un nuovo tratto di percorso, ricavato occupando la sezione di canale in corrispondenza dell'arco più destra del ponte stesso. (figura 2.2)

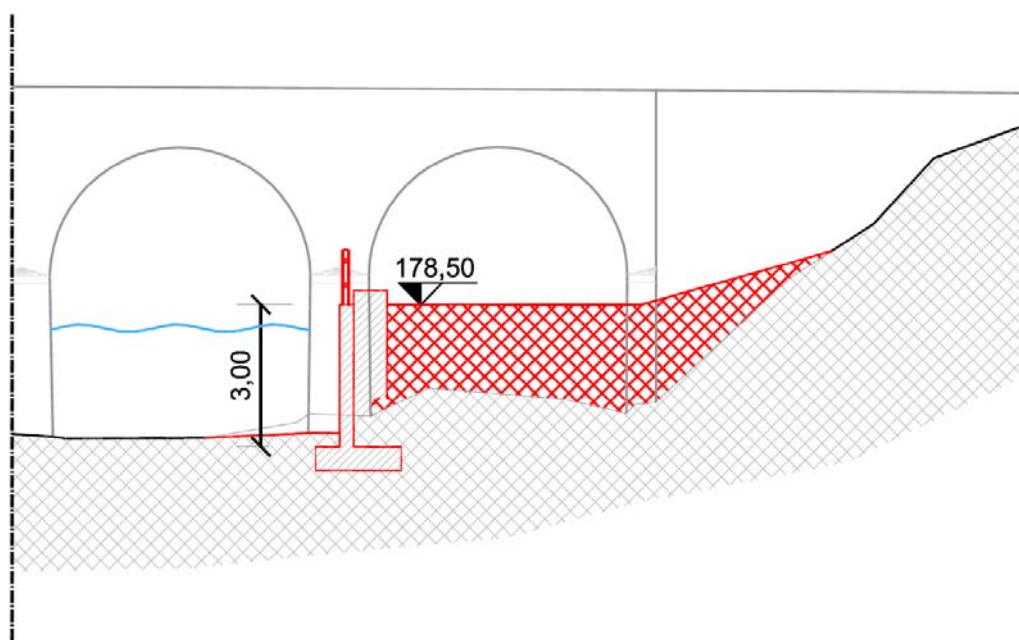


Figura 2.2: passaggio del percorso fruitivo al di sotto del ponte della ferrovia (Nodo 3)

Nei successivi paragrafi si riportano le verifiche idrauliche condotte al fine di valutare come variano i livelli idrici a seguito delle modifiche introdotte dalle opere in progetto sulla geometria del canale.



La ricostruzione del profilo idraulico è stata svolta utilizzando un modello monodimensionale in moto permanente, implementato mediante il software HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System), sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

L'assenza di brusche variazioni della sezione trasversale e la sostanziale omogeneità del canale ha reso appropriato l'utilizzo di un tale modello: l'ipotesi che la componente longitudinale della quantità di moto sia preponderante rispetto a quella trasversale può essere infatti ritenuta ampiamente accettabile per il caso in esame.

2.1 Costruzione della geometria per la configurazione di stato di fatto

Come sopra detto, la ricostruzione del profilo idraulico è stata svolta mediante un modello monodimensionale di moto permanente implementato con il software HEC-RAS 4.1.0 (River Analysis System), sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers.

Il tratto simulato è molto più ampio di quelli oggetto di interesse e si estende sia a monte che a valle dei due interventi in progetto.

Per la descrizione della geometria nel modello dei due tratti di canale oggetto d'interesse, sono stati utilizzati dei rilievi topografici appositamente predisposti; le sezioni rilevate sono state inserite in una geometria più estesa già utilizzata per progetti relativi al medesimo canale.

Per la schematizzazione del nodo 1 sono state inserite 6 delle sezioni di rilievo (figura 3):

- C** sezione del canale a monte del restringimento;
- E** sezione del canale all'inizio del tratto ristretto;
- F** sezione immediatamente a monte del ponte;



- G sezione immediatamente a valle del ponte;
- H sezione del canale al termine del tratto ristretto;
- I sezione del canale a valle del restringimento.

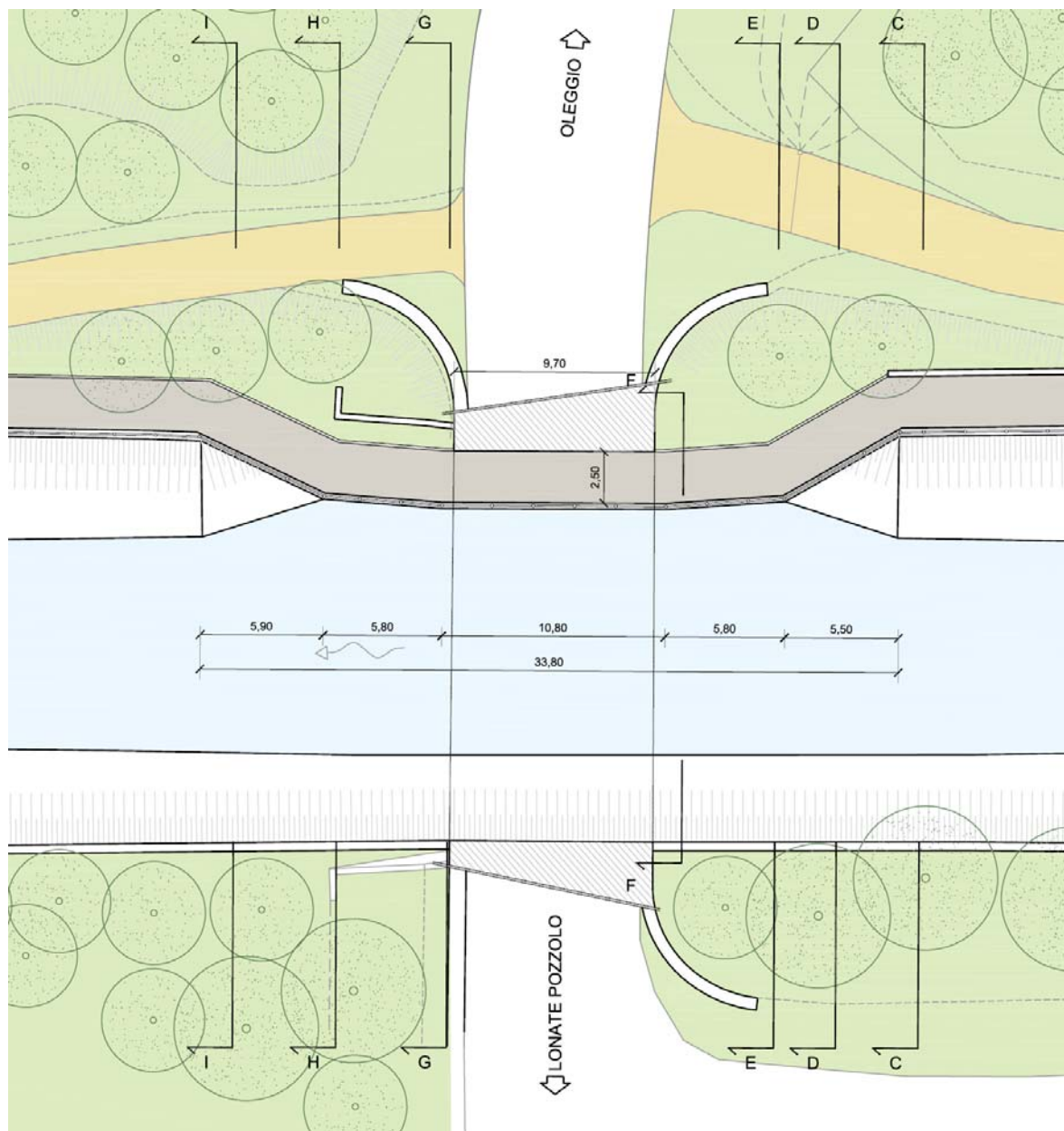


Figura 3: traccia delle sezioni rilevate inserite nel modello per il Nodo 1



Per la schematizzazione del nodo 3 sono state inserite 6 delle sezioni di rilievo (figura 4):

- 5 sezione del canale a monte del restringimento;
- 6 sezione del canale all'inizio del tratto ristretto;
- 7.1 sezione immediatamente a monte del ponte;
- 7.2 sezione immediatamente a valle del ponte;
- 9 sezione del canale al termine del tratto ristretto;
- 10 sezione del canale a valle del restringimento.



Figura 4: traccia delle sezioni rilevate inserite nel modello per il Nodo 3



Ogni sezione è stata descritta mediante coppie di coordinate ascissa-quota; per convenzione, il software considera in sinistra idraulica i punti con ascissa minore e in destra idraulica quelli con ascissa maggiore. (figura 5)

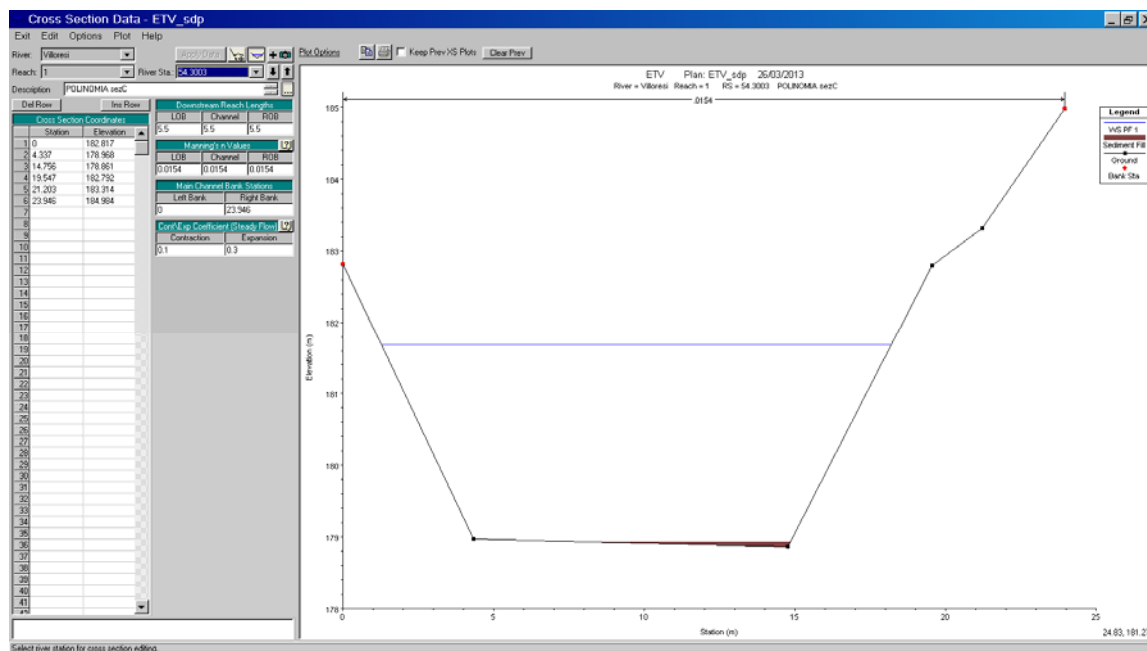


Figura 5: esempio di sezione trasversale inserita in HEC-RAS

Per ogni sezione inserita nel modello è stata inoltre specificata: la lunghezza del tratto di canale compreso tra la sezione stessa e la sezione subito a valle, i coefficienti di Manning rappresentativi della “scabrezza” del rivestimento, i coefficienti di contrazione ed espansione, necessari per valutare la dissipazione di energia della corrente per effetto di brusche variazioni nella geometria del tronco.

In considerazione delle caratteristiche e dello stato di usura del rivestimento accertato in fase di sopralluogo e documentato dalle fotografie di seguito riportate, si assume un coefficiente di Manning medio pari a $0.0154 \text{ s/m}^{1/3}$ (k_s di Strickler $65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) per tutte le sezioni.



Per quanto riguarda i coefficienti di contrazione e di espansione, sono stati adottati i valori suggeriti dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers, pari a:

- perdite di contrazione: 0.1 nei tratti caratterizzati da graduali variazioni di sezione, 0.3 in corrispondenza di bruschi restringimenti;
- perdite di espansione: 0.3 nei tratti con graduali variazioni di sezione, 0.5 in corrispondenza di bruschi allargamenti.

2.2 Portate utilizzate e condizioni al contorno

Essendo il Villorese un canale irriguo, le portate diminuiscono procedendo da monte verso valle come conseguenza delle successive derivazioni. Le portate utilizzate per il tracciamento dei profili di corrente sono quelle fornite dal Consorzio Villorese, ricavate sottraendo alla portata massima in corrispondenza della prima sezione di monte, pari a 55 m³/s, le portate derivate nei vari tratti.

Nello specifico le portate transitanti nei i tratti oggetto d'interesse sono:

- 54.8 m³/s per il nodo 1;
- 22.60 m³/s per il nodo 3.

Il deflusso nel canale in esame, caratterizzato da una pendenza molto modesta (nell'ordine dell'uno per diecimila), assume le caratteristiche di una corrente lenta; per questo motivo il calcolo del profilo idraulico è stato condotto da valle verso monte.

Come condizione al contorno di valle del modello è stata posta l'altezza di moto uniforme, definita dalla pendenza del fondo, pari a 0.5‰, e dalla scabrezza dell'alveo nello stato di fatto ($k_s = 65 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$).



2.3 Configurazione di progetto

La geometria del modello nella configurazione di progetto è stata realizzata introducendo nelle le sezioni di stato di fatto delle “Obstructions” ovvero delle ostruzioni permanenti di una parte della sezione idraulica. (figure 6 e 7)

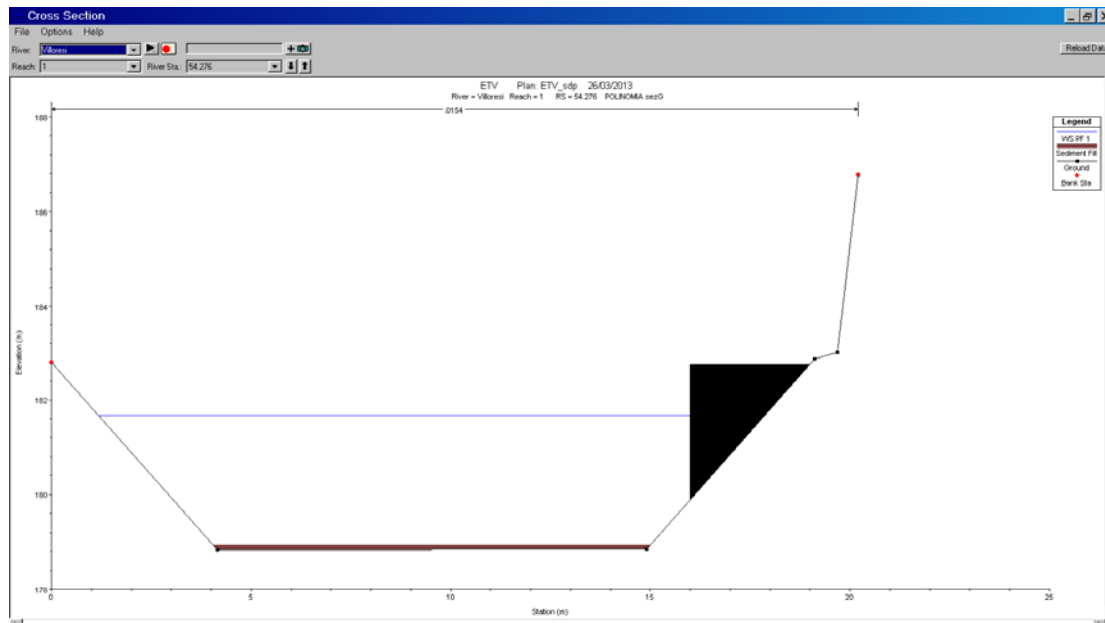


Figura 6: esempio di sezione di stato di fatto modificata utilizzando la funzione “Obstructions” di HEC-RAS (Nodo 1)

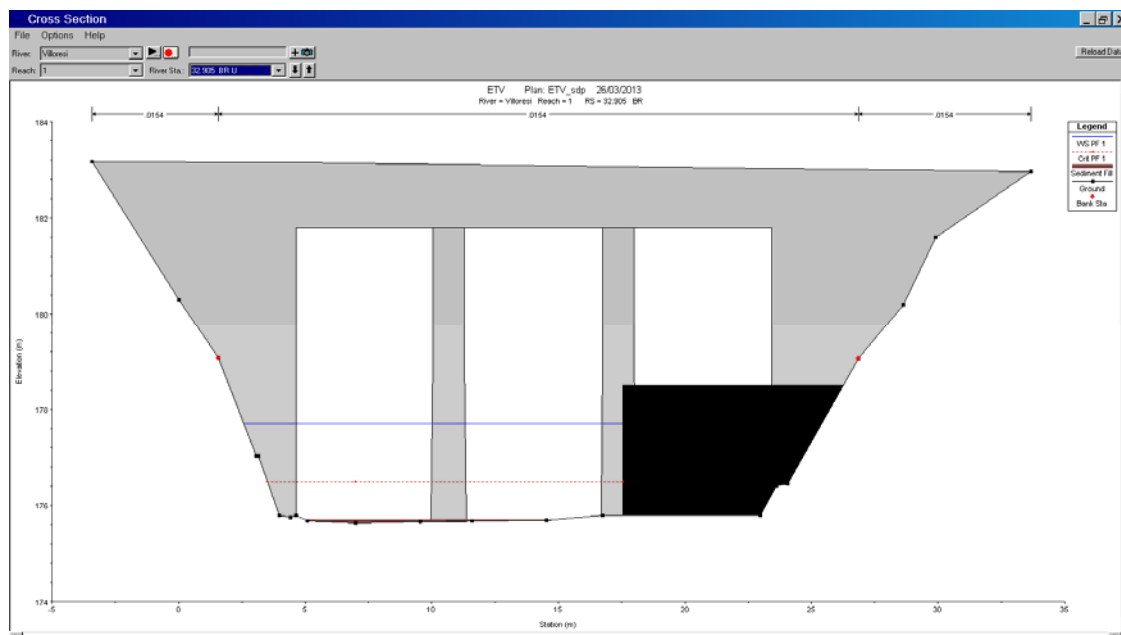


Figura 7: esempio di sezione di stato di fatto modificata utilizzando la funzione “Obstructions” di HEC-RAS (Nodo 2)



Le portate e la condizione al contorno di valle non sono state variata rispetto alle condizioni di stato di fatto.

2.4 Analisi dei risultati

Nella tabella 1 sono riportati i risultati delle simulazioni, per le sezioni in corrispondenza dell'attraversamento della SS 527 (nodo 1), condotte nelle configurazioni di stato di fatto e di progetto.

Nodo 1 - Comune di Lonate Pozzolo: attraversamento della SS 527							
				STATO DI FATTO		STATO DI PROGETTO	
Sezione di rilievo	Distanza sezione valle	Portata	Quota fondo	Quota acqua	Velocità	Quota acqua	Velocità
	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/s]
	8,7	54,8	178,93	181,68	1,47	181,68	1,47
C	5,5	54,8	178,93	181,68	1,46	181,68	1,46
E	5,8	54,8	178,93	181,68	1,46	181,67	1,52
F	10,8	54,8	178,93	181,67	1,45	181,67	1,53
G	5,8	54,8	178,93	181,67	1,44	181,67	1,52
H	5,9	54,8	178,93	181,67	1,45	181,66	1,53
I	12,3	54,8	178,93	181,67	1,45	181,67	1,45

Tabella 1: profilo di corrente calcolato per il nodo 1 nella configurazione di stato di fatto e di progetto.

Come si osserva dal confronto dei risultati tra lo stato di fatto e lo stato di progetto le differenze, sia della quota d'acqua che della velocità, hanno valori del tutto trascurabili.



Nella tabella 2 sono riportati i risultati delle simulazioni, per le sezioni in corrispondenza dell'attraversamento della ferrovia (nodo 3), condotte nelle configurazioni di stato di fatto e di progetto

N3 - Parabiago: attraversamento della ferrovia							
				STATO DI FATTO		STATO DI PROGETTO	
Sezione di rilievo	Distanza sezione valle	Portata	Quota fondo	Quota acqua	Velocità	Quota acqua	Velocità
	[m]	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m/s]	[m]	[m/s]
	13,4	22,6	175,82	177,72	0,97	177,74	0,96
5	20	22,6	175,79	177,72	0,83	177,74	0,82
6	24	22,6	175,76	177,73	0,67	177,75	0,68
7,1	9,79	22,6	175,71	177,73	0,54	177,73	0,79
7,2	13	22,6	175,73	177,72	0,53	177,71	0,8
9	18	22,6	175,74	177,72	0,59	177,71	0,66
10	23,54	22,6	175,75	177,71	0,71	177,71	0,71

Tabella 2: profilo di corrente calcolato per il nodo 3 nella configurazione di stato di fatto e di progetto.

Dal confronto dei risultati tra lo stato di fatto e lo stato di progetto si può osservare quanto segue:

1. in corrispondenza del restringimento del canale (sezioni di rilievo 7.1, 7.2 e 9) si verifica un incremento delle velocità, pari a circa 0.20 m/s, mentre la quota d'acqua rimane sostanzialmente invariata;
2. a monte del restringimento (sezioni di rilievo 5 e 6) si verifica un incremento della quota d'acqua, pari a circa 2 cm, mentre le velocità rimangono sostanzialmente invariate.



Anche per il nodo 3, pertanto, le variazioni di velocità e del livello d'acqua indotte dalle opere previste in progetto hanno valori del tutto trascurabili.



3. NAVIGLIO GRANDE: DESCRIZIONE DEL REGIME IDRAULICO

Per quanto riguarda il Naviglio Grande il progetto è finalizzato anzitutto alla salvaguardia della stabilità delle sponde, in più punti ammalorate o rovinate, ed a risolvere i residui problemi di continuità del percorso fruttivo lungo l'alzaia. Il progetto prevede il consolidamento o la sostituzione dei tratti ammalorati o pericolanti delle sponde del Naviglio Grande operando interventi rispettosi dei caratteri originari delle murature e del carattere storico del manufatto originario.

Si tratta nel complesso di 49 interventi, distribuiti con una certa continuità nel tratto del Naviglio dal Comune di Robecchetto con Induno al Comune di Corsico.

Nei paragrafi che seguono si riporta una descrizione della geometria del canale e del regime idraulico dello stesso, tratta dal *"MASTER PLAN NAVIGLI - Competenza 1 "Bilancio idrico", prodotta dal prof. Claudio Gandolfi (Università degli Studi di Milano) - anno 2004 ed integrata con i dati aggiornati al 2009 delle portate di concessione, forniti dal Consorzio Villoresi.*

3.1 Tracciato

Il Naviglio Grande deriva dal fiume Ticino nella fraz. Tornavento del Comune di Lonate Pozzolo.

Il primo tratto va dall'incile fino a Boffalora scorre all'interno della valle del Ticino; l'andamento è irregolare, frequentemente a mezza costa sul terrazzo alluvionale e per la metà del percorso è sostenuto da alte arginature. Un secondo tratto, tra Boffalora Ticino e Abbiategrasso, si allontana dal Ticino e scorre incassato nella pianura con un andamento più regolare e rettilineo del tratto precedente. Un terzo tratto, infine, pressoché rettilineo e delimitato da muri, costeggia la S.S. Vigevanese e raggiunge Milano, attraversando i comuni dell'hinterland milanese Gaggiano, Trezzano sul



Naviglio, Corsico; il Naviglio termina a Milano presso la Darsena di Porta Ticinese.

La lunghezza totale del Naviglio è di 50,80 km.

3.2 *Pendenza e sezione*

La differenza di quota tra il fondo del canale e il piano campagna del Naviglio Grande va diminuendo dalla presa fino a Castelletto di Abbiategrasso, dove si trova quasi al piano campagna, mentre nel tratto tra Castelletto e Milano alterna tratti incassati a tratti che lambiscono il piano campagna.

Il dislivello complessivo del fondo tra l'incile e la Darsena è di 34,91 m, con pendenza differente nei diversi tronchi.

Il canale presenta per i primi 15 km, una larghezza massima di 50 m e minima di 22 m; per i successivi 24 km la larghezza varia fra 24 m e 18 m, mentre per la rimanente tratta non si hanno mai larghezze inferiori a 12 m.

Nel tronco tra il ponte di Magenta fino a quello di Castelletto vi sono 96 briglie di selciato in ciottoli, con la funzione di ridurre la pendenza ed evitare l'erosione del fondo.



Tratto	Dislivello [m]	Lunghezza [m]	Pendenza [‰]	Sezione
incile (a Tornavento)	5,395	5851	0,9	Larghezza alla sommità delle sponde da 22 a 50 m
ponte di Castano	1,832	1827	1,0	
ponte di Turbigo	1,906	1917	1,0	
ponte di Padregnana	4,484	4495	1,0	
ponte di Castelletto di Cuggiono	1,568	1260	1,2	
località Rubone	1,568	1896	0,8	
ponte di Bernate	1,645	1645	1,0	Larghezza alla sommità delle sponde da 18 a 24 m
Ponte di Boffalora	2,896	2898	1,0	
ponte di Magenta	2,530	2536	1,0	
ponte di Robecco	5,908	5932	1,0	
ponte di Castelletto di Abbiategrasso	7,810	7537	1,0	
ponte di Gaggiano	1,320	1306	1,0	Larghezza alla sommità delle sponde da 12 a 18 m
confine con il Comune di Trezzano	5,150	5545	0,9	
ponte di Corsico	5,970	5935	1,0	Larghezza alla sommità delle sponde da 12 a 18 m
sostegno di Viarenna				

3.3 Rivestimento

Il fondo del Naviglio è quasi completamente in terreno naturale, mentre le sponde sono in parte in terreno naturale ed in parte difese con muri di materiale diverso, in funzione dell'epoca in cui sono state costruite (ciottoli, mattoni, marogne, selciato in ciottoli o in cemento armato); in alcuni tratti più recenti, localizzati prevalentemente nel tratto tra Milano ed Abbiategrasso ed in sponda sinistra nel tratto Ponte Vecchio di Magenta - Robecco sul Naviglio, i muri sono in calcestruzzo. A parte questi ultimi lo stato di conservazione non è da considerarsi buono a causa della vetustà.



3.4 Scaricatori

Nel tratto iniziale del Naviglio in gestione all'ENEL, la portata viene regolata dagli scaricatori delle relative centrali. La portata che giunge al Naviglio a Turbigo, di conseguenza, è sostanzialmente costante e non necessita di ulteriori regolazioni, a meno delle esigenze relative all'asciutta.

Nel tratto compreso tra Turbigo e Milano vi sono nove scaricatori. Il primo si trova a monte dell'idrometro di Padregnana in corrispondenza del cavo S. Antonio, il secondo tra Cassinetta di Lugagnano e Abbiategrasso in corrispondenza del sovrappasso del Canale Scaricatore di Nord Ovest, il terzo al confine tra Abbiategrasso e Albairate in loc. Castelletto, il quarto tra Gaggiano e Vermezzo loc. Casone, il quinto a Gaggiano, il sesto in corrispondenza del sovrappasso del deviatore Olona al confine tra Corsico e Milano, i restanti nel tratto urbano di Milano a S. Cristoforo, S. Boniforte sulla riva di Porta Ticinese ed infine lo scaricatore del Residuo a Porta Ticinese. Lo scopo di questi manufatti è quello di permettere l'asciutta del naviglio nei relativi periodi e di evitare situazioni di crisi e a tal fine vengono gestiti in funzione delle esigenze del momento anche in relazione alle condizioni idrometriche del CSNO, del deviatore Olona e del tratto urbano; gli scaricatori nel tratto extraurbano scaricano in rogge.

A Castelletto vi è anche uno scarico nel Ticinello, cui occorre garantire una portata minima di 2 m³/s.

3.5 Portate derivate e immesse nel Naviglio

Il Naviglio Grande ha una portata nominale di concessione di 60 m³/s nel periodo estivo, ma dal canale della centrale ENEL vengono rilasciati 64 m³/s. (a seguito di un accordo aggiuntivo al disciplinare del 10.03.1954, stipulato fra il Provveditorato Regionale alle Opere Pubbliche per la Lombardia e l'ENEL in data 04.11.1987), e di 35 m³/s nel periodo invernale.



Occorre ricordare che della portata di 64 m³/s del Naviglio Grande, 17,5 m³/s vanno ad alimentare i Navigli di Bereguardo e di Pavia, mentre la residua parte di 46,5 m³/s viene ripartita tra un centinaio circa di bocche da cui si dipartono le corrispondenti rogge che si diramano verso sud e che rimpinguano i canali derivati dai fontanili che si trovano sulla sponda sinistra del Naviglio.

L'andamento delle portate nel periodo considerato (Figura 3.1) mostra, come è da attendersi, una generale costanza delle portate derivate sia nel periodo estivo che invernale.

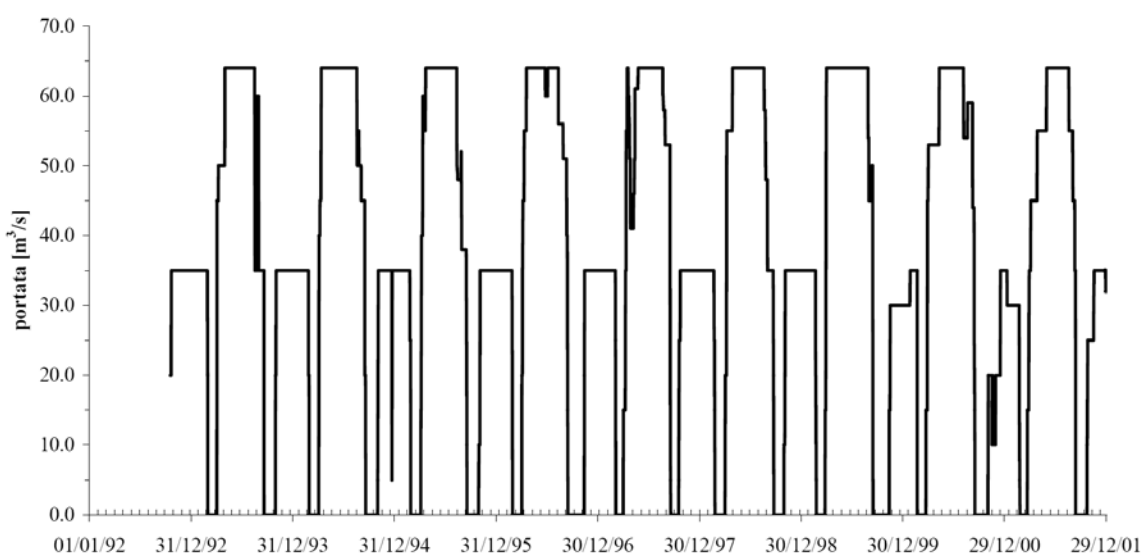


Figura 3.1: Portate medie giornaliere derivate dal Naviglio Grande

Il grafico evidenzia, inoltre, i due periodi di asciutta nel mese di marzo e tra metà settembre e fine ottobre e si osserva anche una tendenza ad anticipare l'asciutta primaverile. Distinguendo i due periodi, estivo ed invernale, la portata media è rispettivamente di 57.84 m³/s (dev. Standard 10.53 m³/s) e 32.52 m³/s (dev. Standard 5.76 m³/s); in Figura 3.2 è riportato l'andamento delle portate medie.

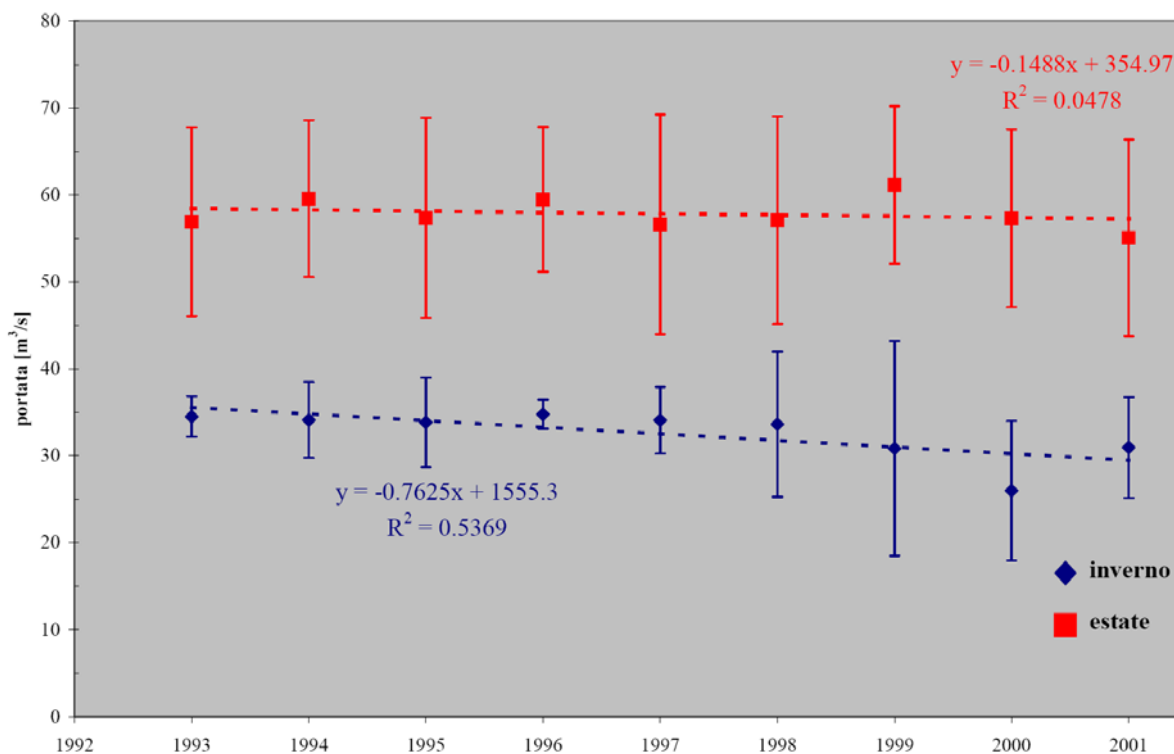


Figura 3.2: andamento delle portate medie invernali ed estive nel periodo 1993-2001

3.6 Derivazioni dal Naviglio

Dal Naviglio Grande derivano il Naviglio di Bereguardo, presso Castelletto di Abbiategrosso, il Naviglio Pavese (o di Pavia) in Milano presso al ponte del Trofeo, e un centinaio di bocche per l'irrigazione. Al 2002 risultano attive in totale 97 derivazioni per una portata derivata complessiva durante il periodo estivo di 36,198 m³/s; altre bocche indicate nella cartografia del Consorzio di Bonifica Est Ticino-Villoresi non risultano invece più utilizzate. La portata arriva, di fatto, invariata fino ad Abbiategrosso dove subisce un brusco abbassamento dovuto alla derivazione del Naviglio di Bereguardo; la maggior parte delle derivazioni ad uso irriguo sono invece localizzate nel tratto che porta a Milano. La superficie irrigata direttamente dal Naviglio Grande (esclusi Bereguardo e Pavese) è stimabile in circa 27.000 ettari. Discorso a parte va fatto per la stagione invernale: le necessità industriali a monte di Turbigo fanno sì che durante questo periodo vi sia un apporto



idrico praticamente costante anche se assestato su valori più bassi. Tale risorsa non è tuttavia utilizzata in ambito agricolo (per il sostanziale abbandono della tecnica delle marcite) e l'acqua in eccesso, che causerebbe problemi nel suo arrivo a Milano, viene indirizzata a seconda delle esigenze in alcune rogge presenti nel territorio.

3.7 *Valutazione delle perdite*

Per la valutazione di massima delle perdite del Naviglio Grande, si è ipotizzato che la portata nominale a Turbigo (pari a circa 64 m³/s) sia in grado di soddisfare tutte le derivazioni (36,2 m³/s), comprese le portate immesse nei navigli di Bereguardo (14,3 m³/s) e di Pavia (8,35 m³/s) e il quantitativo rilasciato nella roggia Ticinello (circa 2 m³/s).

Il quantitativo in eccesso che ne risulta è di circa 3,15 m³/s (circa il 5% della portata iniziale), che corrisponderebbe ad una perdita di circa 60 l/s km.

Tale valutazione non tiene conto dell'eventuale contributo della falda che, nella campagna di misure dell'agosto 1984 risulta di circa 3,5 m³/s. Oltre alle incertezze citate, occorre anche tenere presente la possibilità che il Naviglio riceva scarichi, la cui quantificazione è però impossibile anche in termini di larga massima.

3.8 *Tabella delle portate di concessione aggiornata al 2009*

Si riporta di seguito la tabella delle portate di concessione aggiornata al 2009, fornita dal consorzio villoresi.

**Naviglio Grande**

Portata derivabile da Ticino (l/s)	64 000
Perdite stimate (l/s/km)	55

Tratto Turbigo - Abbiategrasso

Derivazioni	Portata sottoscritta anno 2009 l/s
BEOLCA	220,00
GALLARATI	352,77
SCARICATORE S. ANTONIO	10,00
CORNICI BERNATE	695,80
CORNICI BOFFALORA MONTE	655,93
CORNICI BOFFALORA VALLE	1 052,34
ELETTRICA SAFFA	-
NAI	300,00
NEGRI	300,00
SONCINA	1 171,25
CLARI CALDERARI	331,00
ROMA	518,44
BIRAGO VOLPINA	497,68
VISCONTI	840,00
CORIO LITTA	77,14
TURBINE NEGRI	275,00
CARDINALA	1 300,00

Totale portata derivata	8 597,35
Perdite nel tratto (km 21,2)	1 166,00
Portata disponibile ad Abbiategrasso	54 236,65

Naviglio Bereguardo	
Portata derivabile da N. Grande (l/s)	12 500

Naviglio Grande	
Portata derivabile da N. Grande monte (l/s)	41 737

Tratto Abbiategrasso-Milano

Derivazioni	Portata sottoscritta anno 2009 l/s
TICINELLO MENDOSIO (Antico diritto)	2070
PIONA	403,12
PANIGAROLA 1	181,37
PANIGAROLA 2	111
CINA	249,07
MAGGIA	139,19
S. CORONA	395
AVOGADRO	241



MORETTI	205
LONGONA	333,17
BERETTA	1452
SANT'AMBROGIO	124,03
MISCHIA	483
MISCHIETTA	74,3
LEONA	269,52
BERGONZA	3332
BERGONZA LONATI	94
TREZZI	41,42
CORIO LUCINI	360
ALLIEVI	35
BOSSI	170
BARERA	24
ALIANI	420
CLERICI CALVI	960,5
CARBONIZZA NUOVA	70
CARBONIZZA VECCHIA	140
TAVERNA	442
TRIULZA	593,93
KEWENHULLER	100
FORSANETTA	84,45
GAMBERINA	900
DELFINONA	285,5
DEL FORNO	140
RESIGA	607,44
ARCHINTI	92
MAMBRETTINA	120,95
FORNARA	54
MAMBRETTA	282,63
SCANNAVOTTA	253,3
CAZZANA	1016,06
CAZZANELLA	96
ROGGIONE	409,27
GUASTALLA	295
BORROMEO NUOVA	325
BORROMEO VECCHIA	148
CALIENTA	111
CARREA	420
GEMELLA	630
BELGIOIOSO LUDOVICA	249
CAVETTO TREZZANELLA	144
ROVIDO	67
RIVOLI	67
S. SEMPLICIANO	67
MOLINETTO	488
DE VECCHI	210
BELGIOIOSO SPEZIANA	800



SOCIA	569
RAINOLDA	397
CORIO	566
REFREDDA	315
TRIVULZIO	14
FISCAL CORIO	1288
BORDONA	320
CARLESCHINA	450
PAIMERA	485
BARTOLOMEA	379
RESTOCCO	100
DESA	650
CARLESCA	550
S. BONIFORTE	550
FOPPA	132
TICINELLO RESIDUO	2414
GRANDE PMP	6
GUARDIA	140
CAMPAZZO GRANDE	
CAMPAZZO PICCOLA	

Totale portata derivata	31 201,22
Perdite nel tratto (km 21,4)	1 177,00
Portata disponibile in Darsena P.ta Ticinese (l/s)	9 358,43

Naviglio Pavia	
Portata derivabile da N. Grande (l/s)	9 358



APPENDICE A – IL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS

Il software utilizzato nel presente studio è HEC-RAS 4.1.0.

Il pacchetto HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), elaborato dall'U.S. Army Corps of Engineers è uno strumento di calcolo idraulico monodimensionale dalla consolidata affidabilità, ampiamente utilizzato in campo internazionale e nazionale. HEC-RAS permette di condurre l'analisi idraulica monodimensionale sia a moto permanente che vario. L'interfaccia utente (Graphical User Interface GUI) permette un agevole inserimento di dati ed una pronta analisi dei risultati. La possibilità di georeferenziare le sezioni introdotte permette una intuitiva rappresentazione grafica dei risultati.

Il modello a moto permanente costruito con il codice di calcolo HEC-RAS permette di valutare tutte le grandezze idrauliche di interesse per una corrente gradualmente variata in regime subcritico, supercritico o misto.

Tale codice di calcolo è basato essenzialmente sull'integrazione alle differenze finite dell'equazione dell'energia di una corrente. Le perdite di energia sono valutate mediante il coefficiente di scabrezza di Manning per le perdite distribuite e mediante i coefficienti di contrazione ed espansione della corrente, che consentono di valutare le perdite concentrate dovute a variazioni della sezione trasversale. Nella simulazione del moto vario il modello utilizza il motore di calcolo UNET sviluppato dal Dr. Robert L. Barkau's. UNET risolve le equazioni complete di De St. Venant utilizzando uno schema di risoluzione implicito alle differenze finite. Tale schema di calcolo è stato sviluppato per il moto vario in corrente subcritica.

Lo schema di risoluzione utilizza il metodo di Newton-Raphson iterativo per risolvere equazioni non lineari. Pur utilizzando una soluzione linearizzata, tale codice di calcolo è in grado, avendo l'accortezza di utilizzare intervalli di calcolo sufficientemente ridotti, di fornire risultati affidabili e stabili per una



corrente subcritica. Il software permette inoltre di simulare in modo efficace le singolarità introdotte nel modello: ponti, tratti tombinati, invasi in linea e in derivazione, sfioratori in linea, sfioratori laterali, luci a battente.

I profili di corrente sono calcolati risolvendo, mediante procedura iterativa (standard step method), la seguente equazione del bilancio dell'energia fra due sezioni 1 e 2:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

dove:

- Y_1, Y_2 : Altezze idriche in corrispondenza delle sezioni 1 e 2,
- Z_1, Z_2 : Quote dei punti di thalweg in corrispondenza delle sezioni 1 e 2,
- V_1, V_2 : Velocità medie della corrente,
- α_1, α_2 : Coefficienti di ragguglio dell'altezza cinetica,
- g : Accelerazione di gravità,
- h_e : Perdite fra le sezioni, calcolate con l'espressione:

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

- L : Distanza fra le sezioni pesata sulle portate,
- S_f : Pendenza della linea dell'energia per le perdite distribuite,
- C : Coefficiente di espansione o contrazione.

Per distanza fra le sezioni pesata sulle portate si intende la lunghezza calcolata con la seguente formula:



$$L = \frac{L_{lob} Q_{lob} + L_{ch} Q_{ch} + L_{rob} Q_{rob}}{Q_{lob} + Q_{ch} + Q_{rob}}$$

dove:

L_{lob} , L_{ch} , L_{rob} : Distanza fra le sezioni specificata rispettivamente per la golen sinistra, per l'alveo e per la golen destra,

Q_{lob} , Q_{ch} , Q_{rob} : Somme aritmetiche delle portate defluenti rispettivamente nella golen sinistra, nell'alveo e nella golen destra.

Le ipotesi alla base del modello sono le seguenti:

- si ipotizza che il moto sia gradualmente variato, ovvero che, in corrispondenza di ciascuna sezione, vi sia una distribuzione idrostatica delle pressioni,
- in prossimità di singolarità, dove il moto diventa rapidamente variato, il programma utilizza in automatico, invece dell'equazione dell'energia, l'equazione dell'equilibrio delle spinte o altre equazioni empiriche,
- il moto è monodimensionale,
- la pendenza del corso idrico è generalmente modesta.

Con il supporto del software HEC-RAS, è possibile calcolare, in tutte le sezioni di interesse del modello, le principali caratteristiche della corrente sia in moto permanente che vario. I dati necessari per la costruzione del modello sono i dati geometrici relativi alle sezioni, le distanze fra le sezioni, i coefficienti di scabrezza, i coefficienti di espansione e contrazione, la descrizione geometrica ed i parametri idraulici di eventuali strutture aggiuntive (ponti, traverse, sfioratori). Oltre a questi dati occorre inserire le condizioni al contorno per il dominio di calcolo, che possono essere ad esempio l'altezza critica, l'altezza di moto uniforme etc.



Nell'inserimento dei dati relativi alla geometria, HEC-RAS permette di georeferenziare sia il tracciato dell'asta fluviale, sia le sezioni fluviali, permettendo così la costruzione di una visualizzazione prospettica del modello e dei suoi risultati in termini di livelli idrici.

L'opzione "Ineffective Areas" permette di definire, per ciascuna sezione, una porzione della stessa che non partecipa attivamente al deflusso: in tali aree, soggette comunque ad allagamento, la velocità di deflusso è molto prossima allo zero. Il volume invasato è incluso nell'equazione di continuità, ma la porzione di perimetro bagnato relativo a tali aree non partecipa al calcolo delle perdite distribuite. Tali aree vengono di solito utilizzate in prossimità di strutture che ingombrano parte della sezione di deflusso e creano delle zone dove effettivamente la velocità di deflusso è prossima allo zero.

È inoltre possibile fissare una quota di disattivazione di tali aree; ovvero quando il livello idrico nella sezione raggiunge o supera tale valore la porzione di sezione viene attivata e partecipa al deflusso.

La contrazione e l'espansione della vena liquida fra due sezioni adiacenti è causa di perdite di carico valutate dal codice di calcolo come concentrate con l'utilizzo di opportuni valori del coefficiente C.

Tipici valori, nel caso di correnti lente variano fra 0.1 e 0.3 per il coefficiente di contrazione e fra 0.3 e 0.5 per il coefficiente di espansione. I valori più elevati sono tipici in prossimità dei restringimenti causati dall'ingombro delle spalle e delle pile dei manufatti di attraversamento.

Tali coefficienti sono quindi utilizzati per valutare le perdite di energia a valle e a monte dei ponti inseriti nel modello. Il programma ha la capacità di utilizzare approcci di calcolo differenti per simulare le diverse configurazioni di passaggio della corrente, a seconda che l'altezza idrica interessi o meno l'impalcato del ponte e che il deflusso sia in regime di corrente lenta, veloce o passi per lo stato critico in corrispondenza dell'attraversamento.



Nel caso di corrente completamente subcritica che non interessa l'impalcato dei ponti, l'effetto di rigurgito indotto dalla presenza delle spalle può essere valutato dal programma mediante diverse opzioni:

Standard Step Method,

Bilancio delle spinte,

L'equazione empirica di Yarnell,

Il metodo FHWA WSPRO.

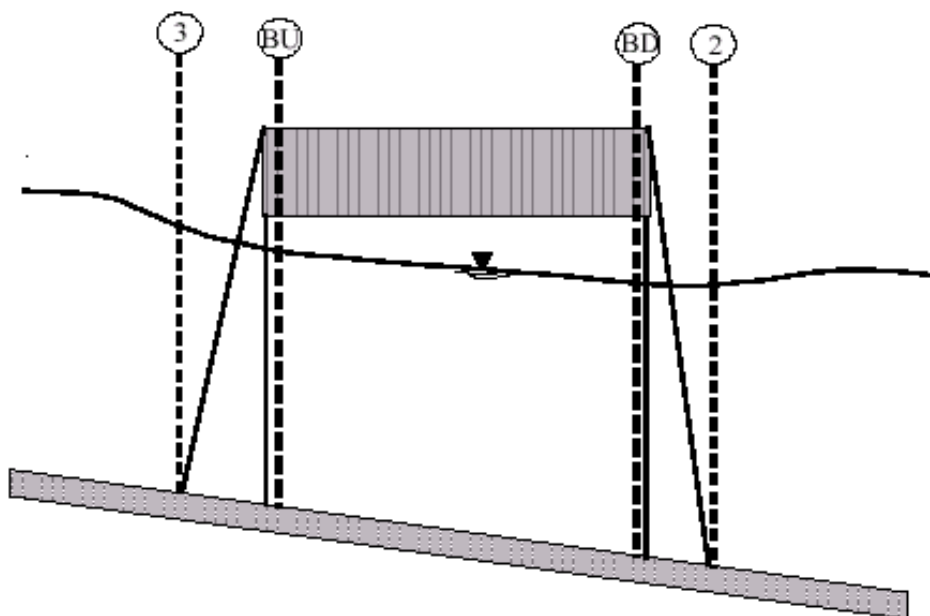


Figura 1. Profilo in corrispondenza di un ponte.

Lo Standard Step Method utilizzato per calcolare il rigurgito dei ponti è del tutto analogo a quello descritto per il bilancio dell'energia tra due sezioni, con la differenza che in corrispondenza dei ponti lo Standard Step è ripetuto tre volte: la prima volta tra la sezione a valle del ponte (sezione 2 in figura 1) e le luci del ponte lato valle (sezione BD in figura 1), la seconda tra le luci del ponte lato valle e le luci lato monte (sezione BU in figura), la terza



tra le luci lato monte e la prima sezione a monte del ponte (sezione 3 in figura 1).

Il bilancio delle spinte viene realizzato in un processo con tre step. Nel primo passo si valuta un bilancio tra la sezione 2 e la sezione BD con la seguente equazione:

$$A_{BD} Y_{BD} + \frac{\beta_{BD} Q_{BD}^2}{g A_{BD}} = A_2 Y_2 + \frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} - A_{pBD} Y_{pBD} + F_f - W_x$$

dove:

A_2, A_{BD} : area attiva rispettivamente alla sezione 2 e BD,

A_{pBD} : area ostruita dalla pila nel lato verso valle,

Y_2, Y_{BD} : distanza verticale dalla superficie dell'acqua al centro di gravità della corrente con area rispettivamente A_2 e A_{BD} ,

Y_{pBD} : distanza verticale dalla superficie dell'acqua al centro di gravità della parte di pila sommersa nel lato verso valle,

β_2, β_{BD} : coefficienti di ragguglio della velocità per l'equazione della quantità di moto,

Q_2, Q_{BD} : portate in corrispondenza delle sezioni 2 e BD,

g : accelerazione di gravità,

F_f : forza di attrito per unità di peso dell'acqua,

W_x : componente del peso dell'acqua nella direzione del flusso, per unità di peso dell'acqua.

Nel secondo passaggio l'equazione di bilancio viene risolta tra le sezioni BD e BU:

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



Infine nel terzo passaggio l'equazione di bilancio è fatta tra la sezione BU e la sezione 3:

$$A_3 Y_3 + \frac{\beta_3 Q_3^2}{g A_3} = A_{BU} Y_{BU} + \frac{\beta_{BU} Q_{BU}^2}{g A_{BU}} + A_{p_{BU}} Y_{p_{BU}} + \frac{1}{2} C_D \frac{A_{p_{BU}} Q_3^2}{g A_3^2} + F_f - W_x$$

dove C_D è un coefficiente di flusso attorno alle pile.

L'equazione empirica di Yarnell, con riferimento alla figura precedente, è la seguente:

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

dove:

- H_{3-2} : dislivello nel pelo libero tra la sezione 3 e la sezione 2,
- K : coefficiente di Yarnell di forma delle pile,
- ω : rapporto dell'altezza cinetica sulla profondità alla sezione 2,
- α : area ostruita dalle pile divisa per l'area totale senza ostruzioni alla sezione 2,
- V : velocità a valle della sezione 2.

L'altezza del pelo libero nella sezione di monte dell'attraversamento è data dall'altezza a valle sommata alla quantità H_{3-2} , che rappresenta dunque il rigurgito provocato dal ponte.