

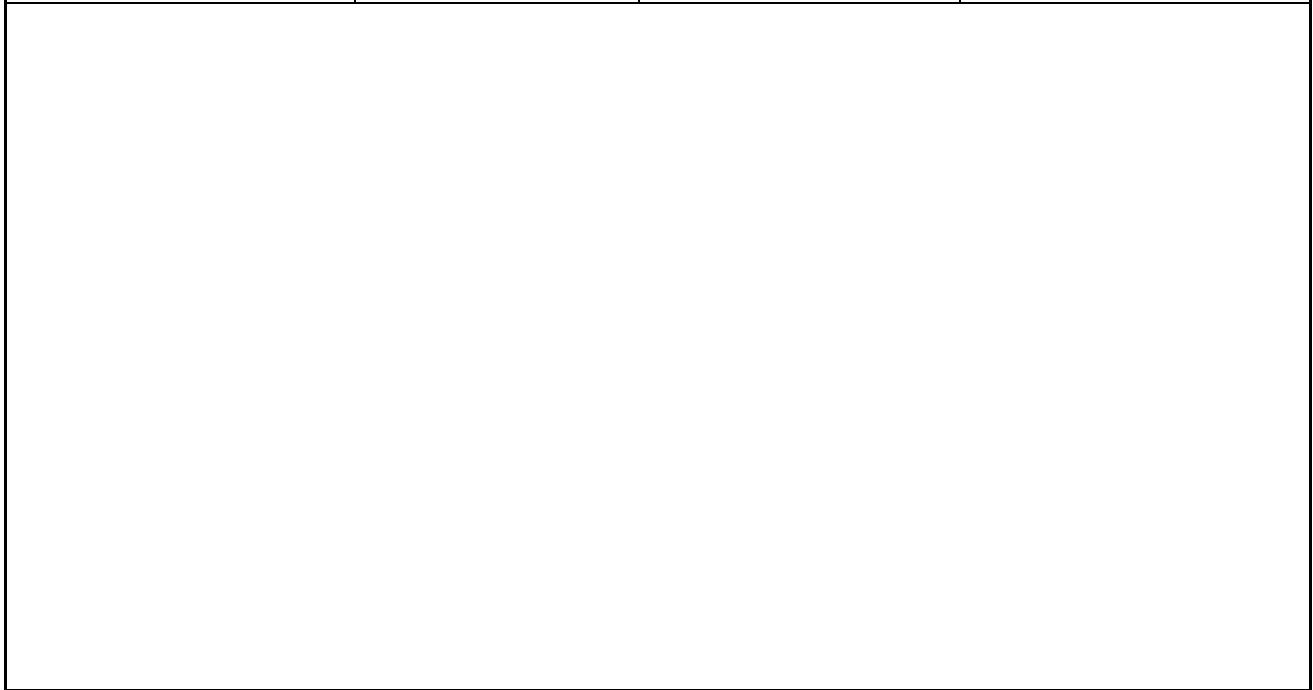
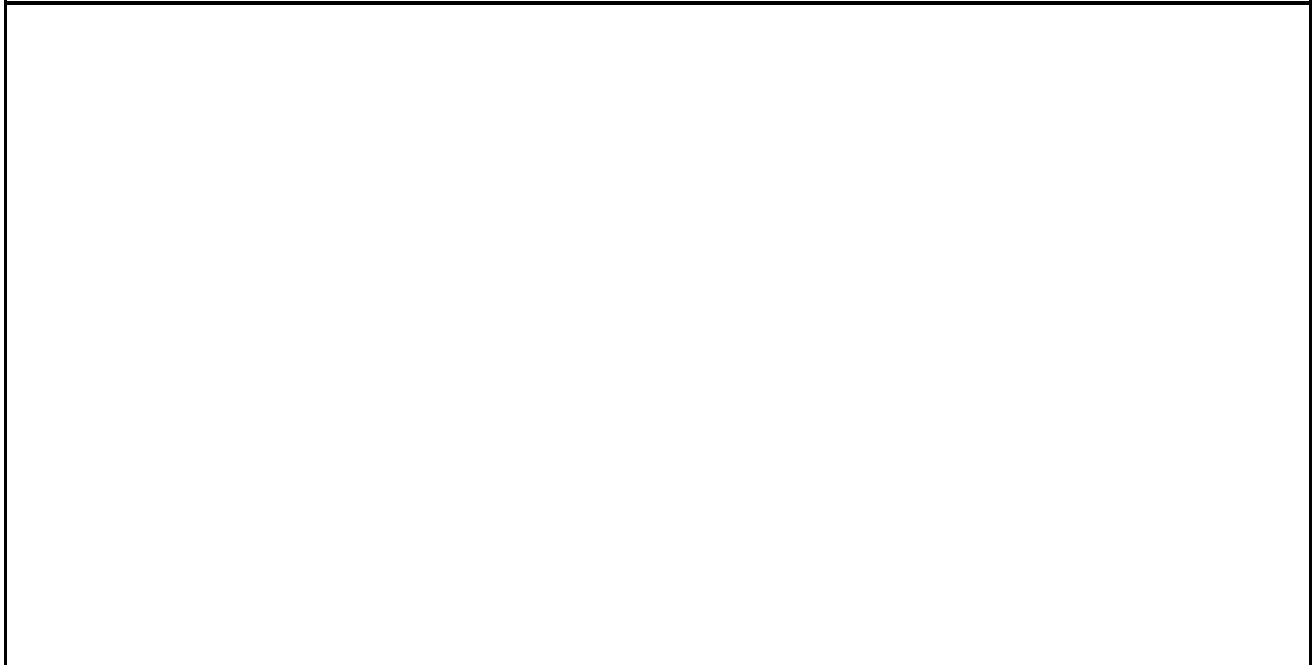


<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-001-0157	<b>Foglio</b> 1            di            27	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
CANALE MUZZA**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	2	di	27	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL CANALE MUZZA</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE</b>	<b>12</b>
5.1	Erosione al fondo	12
5.2	Definizione della profondità di posa	14
5.3	Verifica del gradiente critico	16
5.4	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	17
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>19</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS</b>	<b>20</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>26</b>
	<b>ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE</b>	<b>27</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		3	di		27

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Canale Muzza, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56"), DP 75 bar, Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del canale che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno, per cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con un microtunnel di diametro interno 2400 mm. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 100 m dagli argini del Canale. La profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge poco più di 11,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il microtunnel DN 2400 verrà intasata con malta bentonitica o cementizia. Una volta terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opere finite l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il canale e le sue pertinenze.

L'attraversamento del Canale Muzza è ubicato in una zona distinta in dettaglio ai F. 12 e 13 del NCT del Comune di Mulazzano (LO).

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 4 di 27						

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	5	di	27	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Canale Muzza è un canale artificiale che dirama le acque dal fiume Adda e le restituisce al medesimo fiume dopo un percorso di circa 60 km. Nasce a Cassano d'Adda e termina a Castiglione. È il canale italiano con maggiore portata ed il primo artificiale costruito nel nord Italia (uno dei primi in assoluto in tutto il mondo).

Nella prima parte del suo percorso sono presenti quattro scolmatori che riportano l'acqua in Adda. Lungo il suo corso riceve gli apporti di un corso d'acqua naturale, il Molgora e di alcune rogge mentre scarica parte delle acque per alimentare il Colatore Addetta alla Chiusa di Paullo. In questo punto termina il corso più antico della Muzza, tratto di probabile origine naturale, per iniziare quello artificiale realizzato già nel XIII secolo.

Lungo questo secondo tratto è presente un'altra derivazione significativa, quella del Canale Villavesco che deriva un'importante quota d'acqua in corrispondenza della centrale termoelettrica di Montanaso e le recapita sempre in Adda.

L'attraversamento in progetto ricade in questo secondo tratto del canale in una zona posta circa a metà dell'intero percorso del canale stesso.

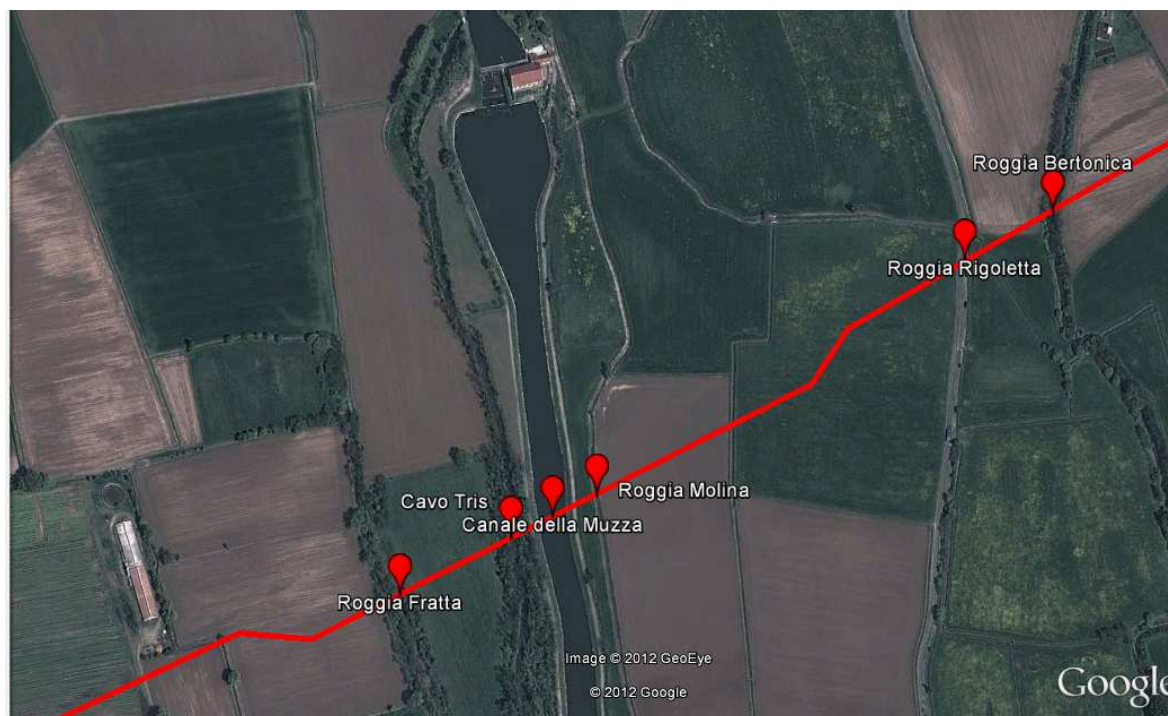


Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio 6 di 27					

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa il Canale Muzza è un opera artificiale che riceve le acque da due corsi d'acqua naturali, l'Adda ed il Molgora, ed alimenta una serie di canali e derivazioni ad uso industriale ed irriguo.

Non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si procederà alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento con un franco di sicurezza di 50 cm.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori determinerebbero il superamento delle arginature, con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni, pertanto, ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente, nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 750,0 \text{ mc/sec}$$

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	7	di	27	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL CANALE MUZZA

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 150 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tabella 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 8 di 27					

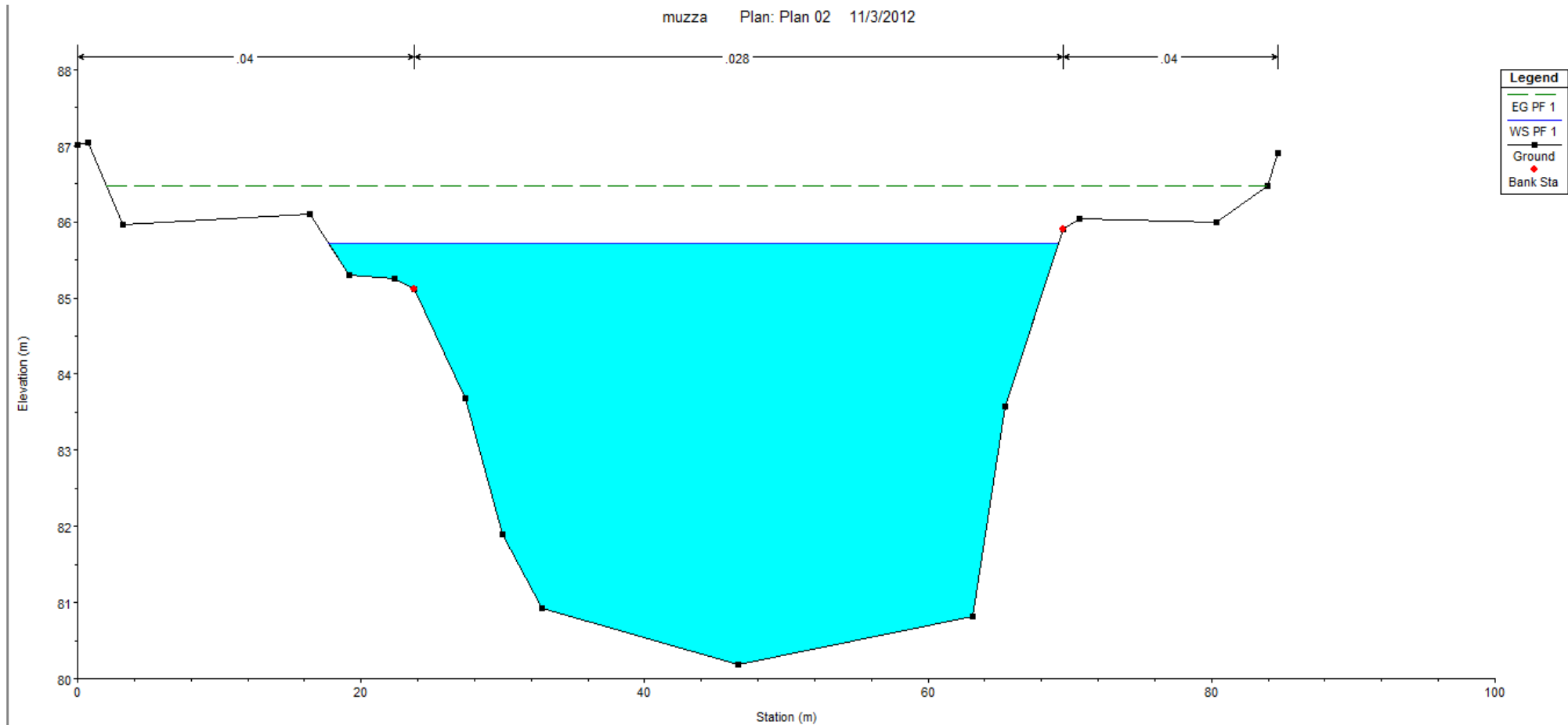


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato



METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 9 di 27					

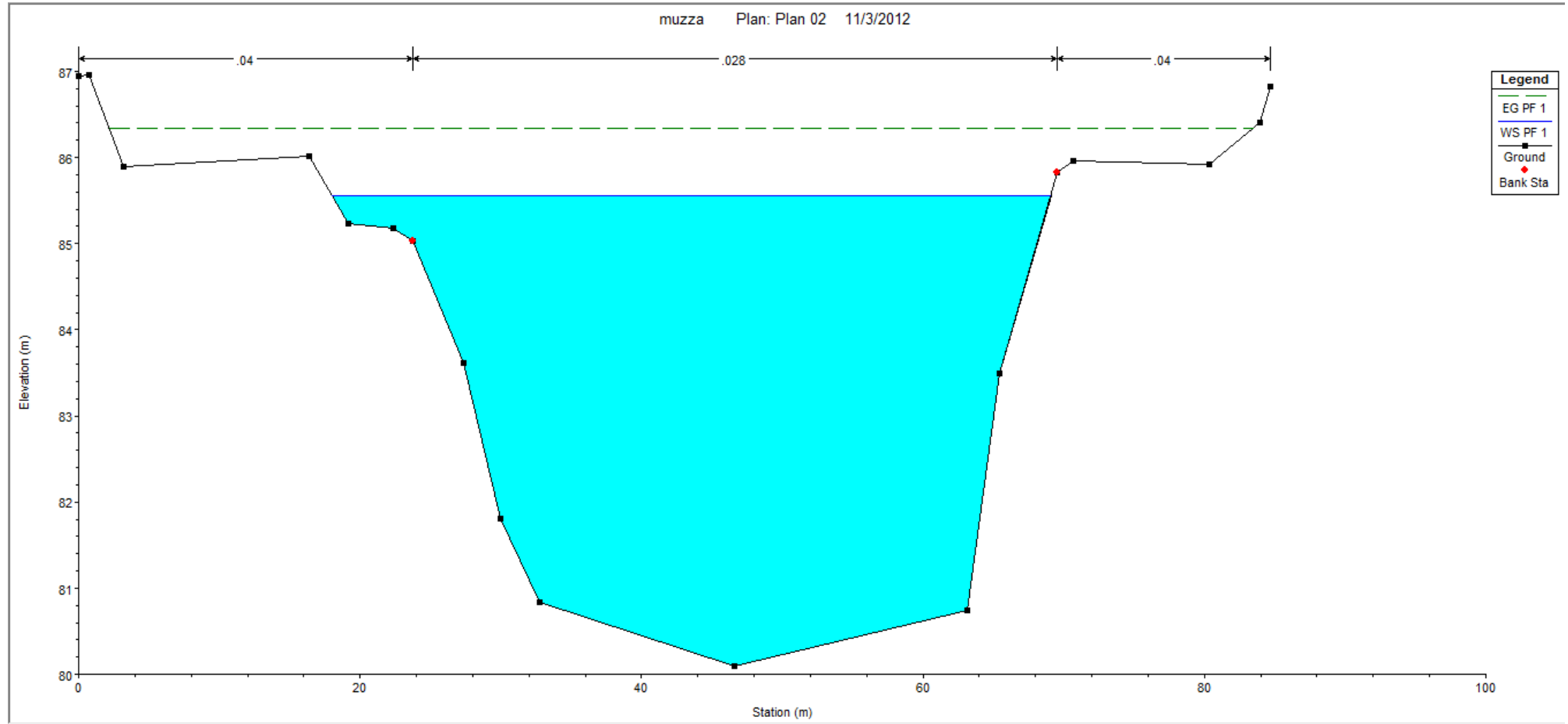


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio		10	di	27	

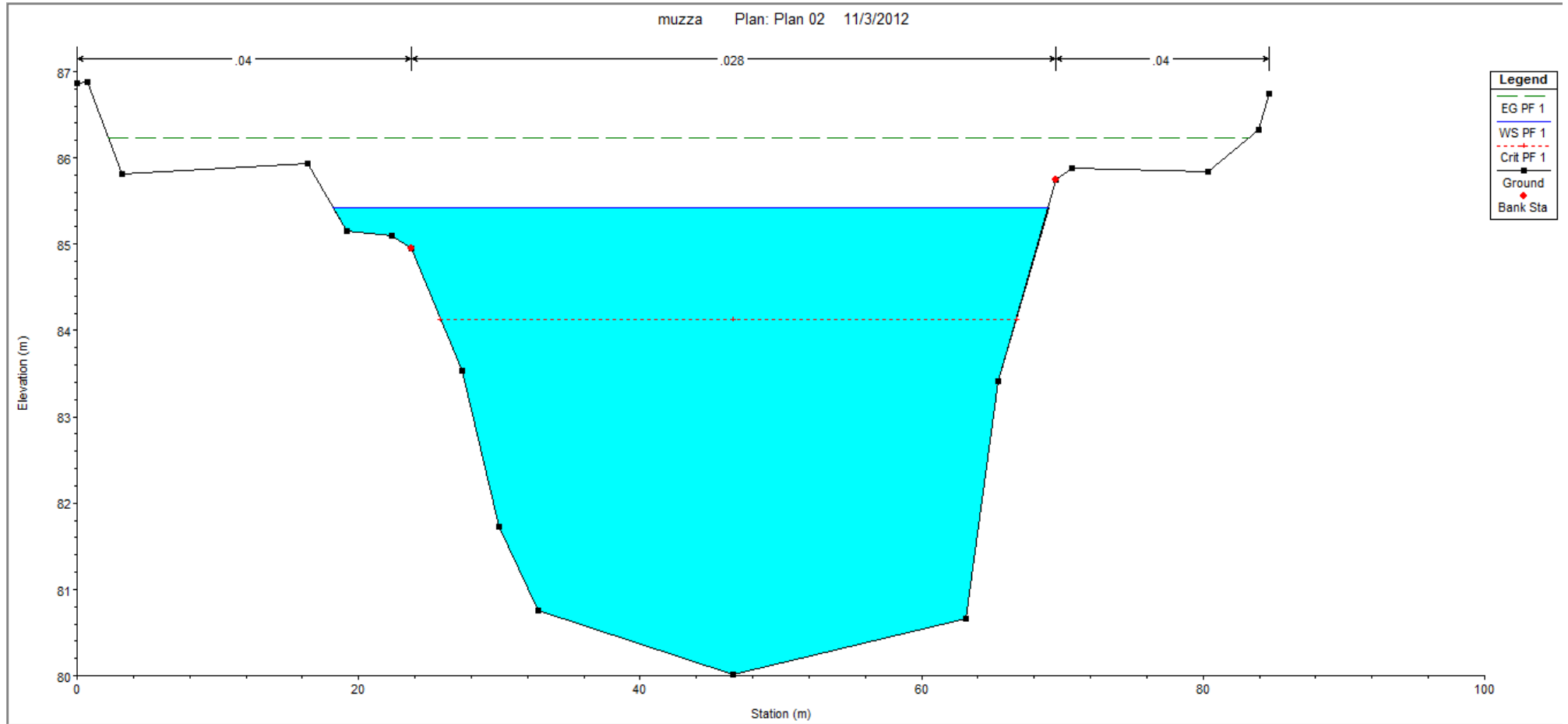


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>									
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>									
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157		Rev.: 00						N°Doc. Cliente:	
		Foglio 11 di 27							

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ tot [N/mq]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	750	80.18	85.72		86.47	0.001808	3.84	197.24	51.54	0.59	3.62	64.19	71.37
20	750	80.1	85.56		86.34	0.001927	3.92	192.82	51.09	0.61	3.57	67.49	74.82
10	750	80.02	85.43	84.13	86.23	0.002	3.97	190.3	50.83	0.62	3.54	69.48	76.9

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>							
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 12 di 27						

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 13 di 27					

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 2,75 \text{ m}$$

Su tale valore, tuttavia, è bene considerare che le formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 2,00, risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 2,75 * 2,00 = 5,50 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	14	di	27	

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b_{max}} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b_{max}}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	30,50
<b>Y</b>	5,46
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	2,79
<b>βc</b>	8,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta > \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene pertanto che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare non inferiore a circa 5,50 m; poiché la tecnica esecutiva ipotizzata prevede di raggiungere una profondità di 11,60 m(°) dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

(°) imposta dalle caratteristiche dimensionali e geometriche del microtunnel ?

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	27	

## VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici o modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo, ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica (il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere). Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 16 di 27				

1. verifica del gradiente critico
2. verifica dei percorsi di filtrazione equivalenti

### 5.3 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>3</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

Poichè in questo tratto il canale scorre parzialmente incassato rispetto al piano campagna, a titolo cautelativo, la verifica viene condotta rispetto al fondo dell'adiacente Cavo Tris nell'ipotesi che la Muzza sia pieno al massimo livello mentre il cavo sia vuoto.

Risulta in tal modo una differenza di livello  $\Delta h_{max} = 1,35$  m

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 3)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>4</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Nel caso in esame si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

Δh [m]	1,35

<sup>3</sup> Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

<sup>4</sup> Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all' 80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
			Foglio	17	di	

$L_{1-2-3}$ [m]	49,50
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	1,5 <sup>5</sup>
$i_{cr} / i$	14,66

Tabella 4: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

#### 5.4 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_1 \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a 45°) vengono inserite nel conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

---

5 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni di perforazione, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
			Foglio	18	di	

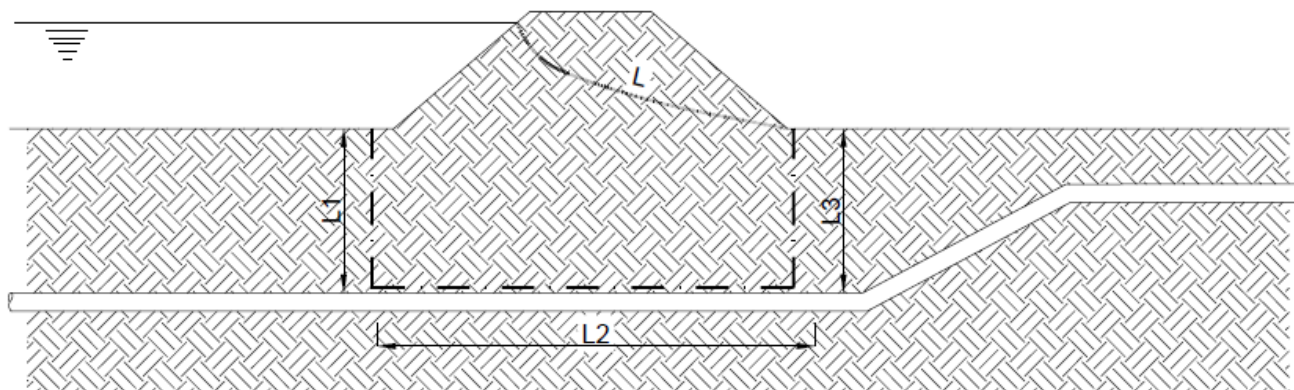


Figura 3: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

Assumendo le stesse ipotesi viste al punto precedente, il dislivello massimo risulta di 1,35 m.

Risulta quindi:

L1 [m]	11,60
L2 [m]	22,50
L3 [m]	15,40
L [m]	17,0
$0,1 \times L$	1,70
$L_t > 1,2 \times L$	Ok

Tabella 5: verifica del percorso equivalente

Poiché risulta sempre  $L1 > 0,1 \times L$  e  $L_t > 1,2 \times L$ , la verifica è sempre soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	19	di	27	

## 6 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Canale Muzza che, si ricorda, verrà eseguito mediante realizzazione di un microtunnel, con diametro interno 2400 mm e una profondità di m. 11,60 rispetto al punto più depresso del fondo alveo.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente con un coefficiente di sicurezza notevolmente superiore a 2,00;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento sia nel breve che nel lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>							
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 20 di 27						

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	21	di	27	

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 22	di 27			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

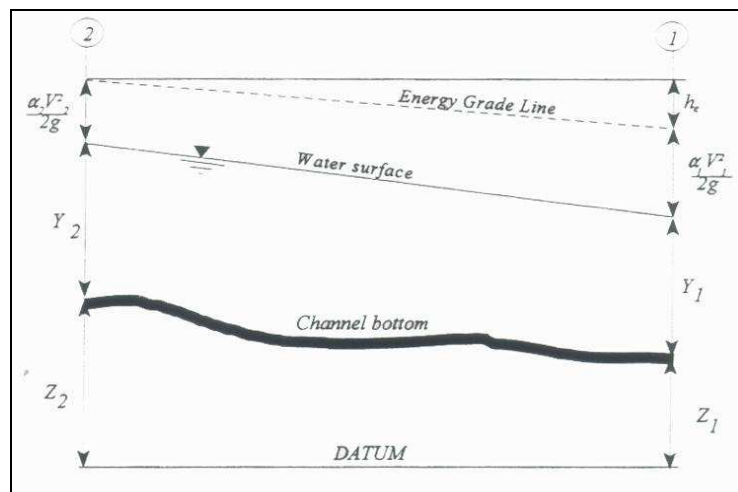


Fig.1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 23	di 27			

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la gola di sinistra, il canale di magra e la gola di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 24	di 27			

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

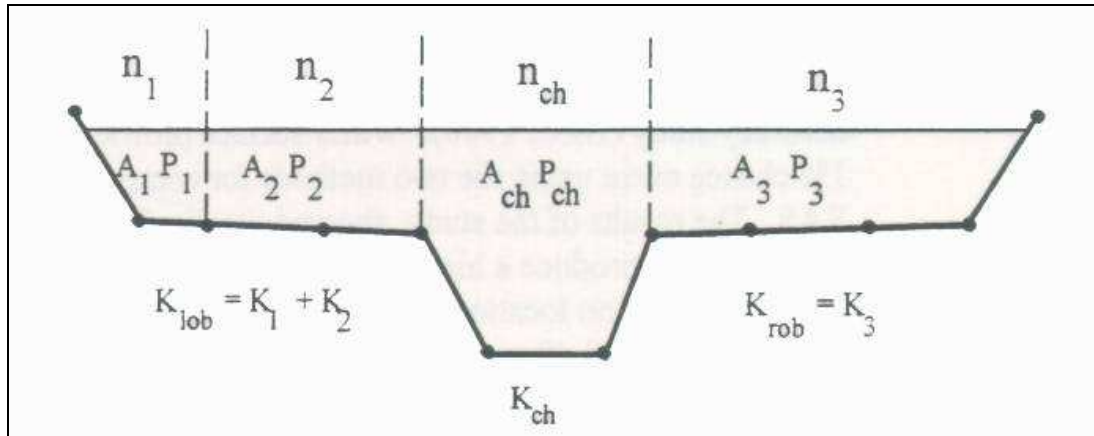


Fig. 2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0157	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	25	di	27	

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

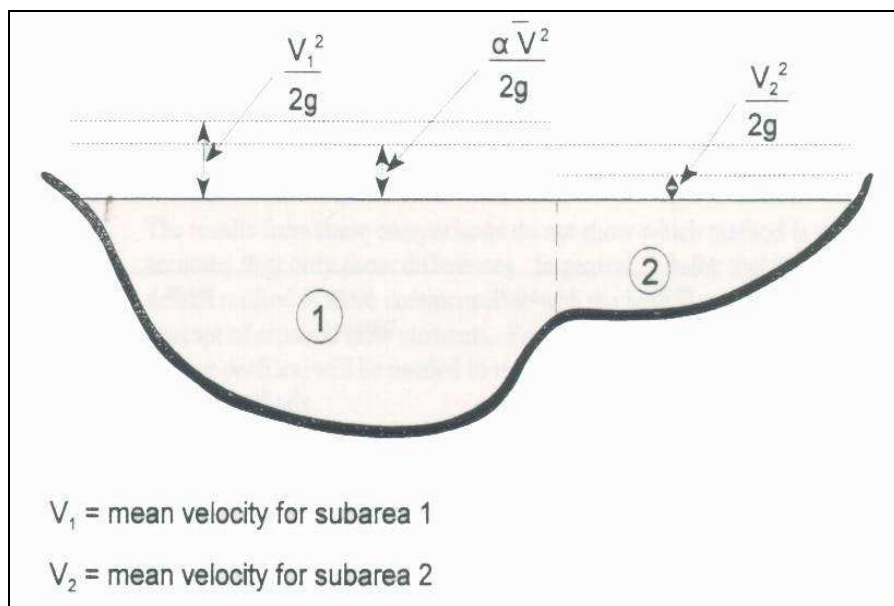


Fig.3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 26 di 27					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

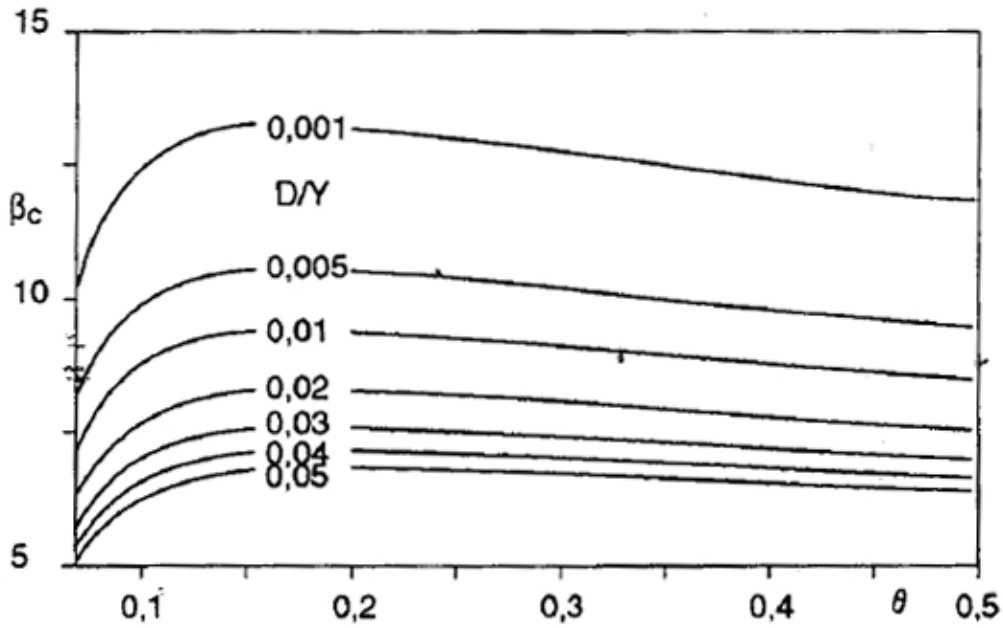


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^6$

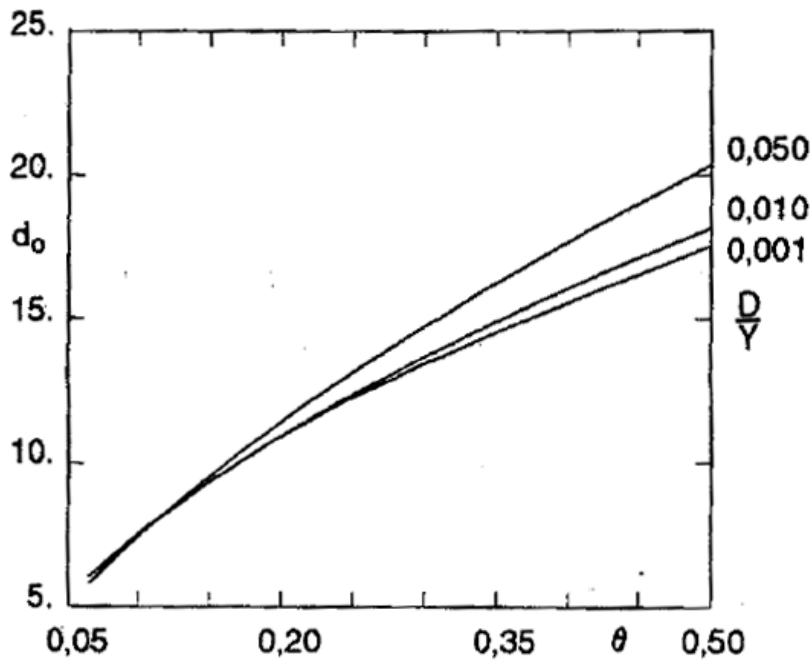


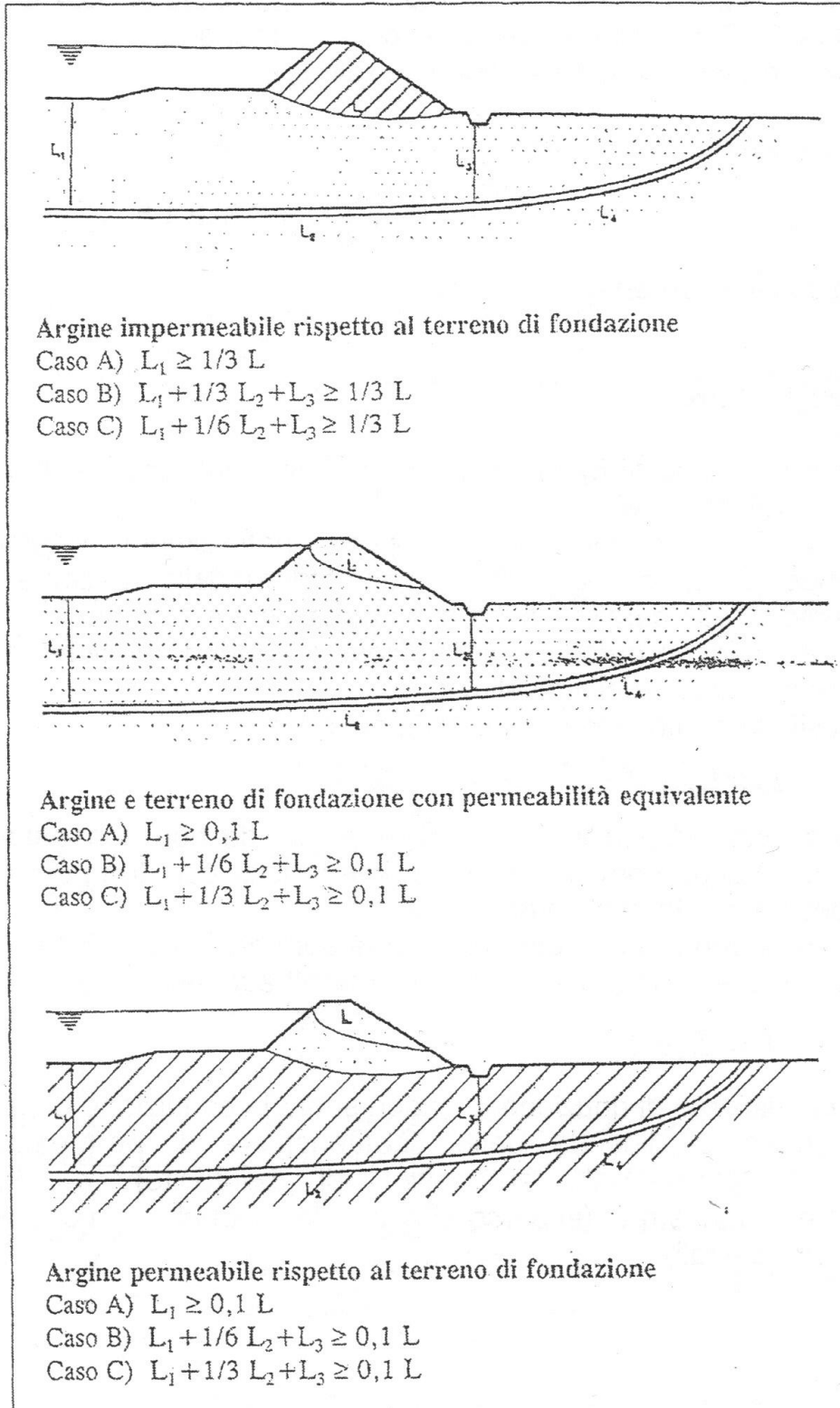
Tabella per la determinazione di  $d_0^7$

<sup>6</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna



<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

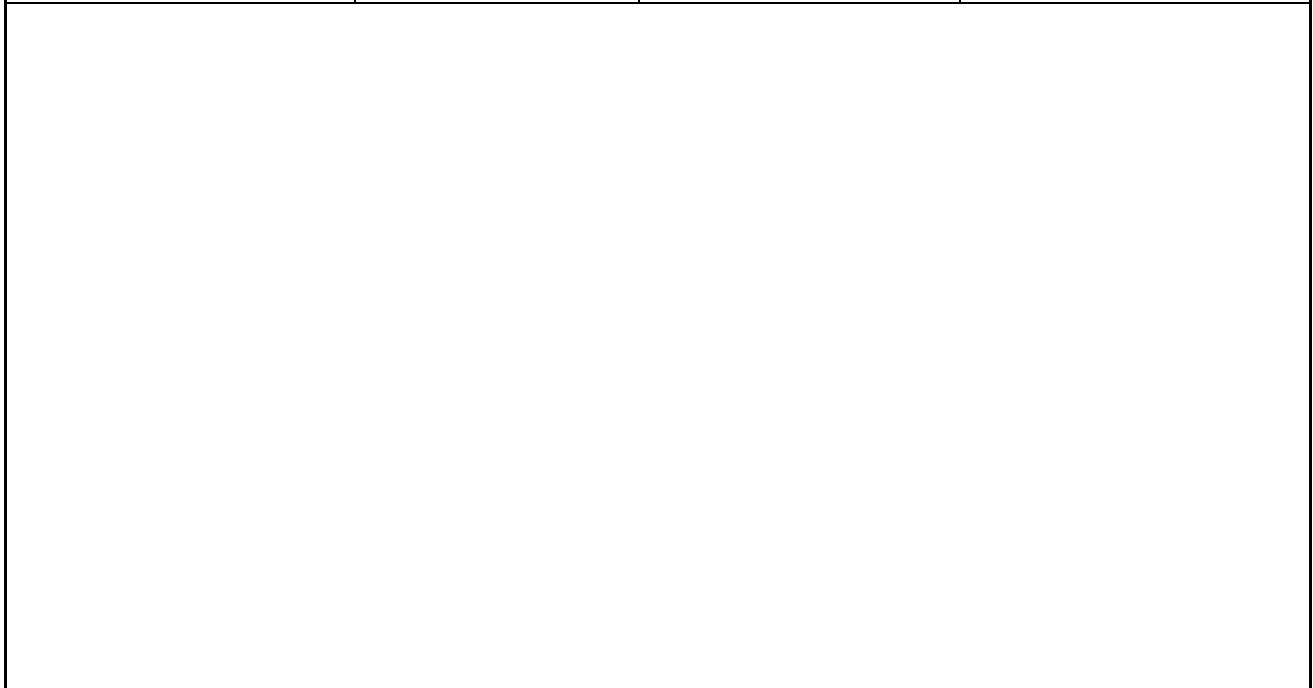
METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA CANALE MUZZA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0157	Foglio 27 di 27					

### ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>8</sup>

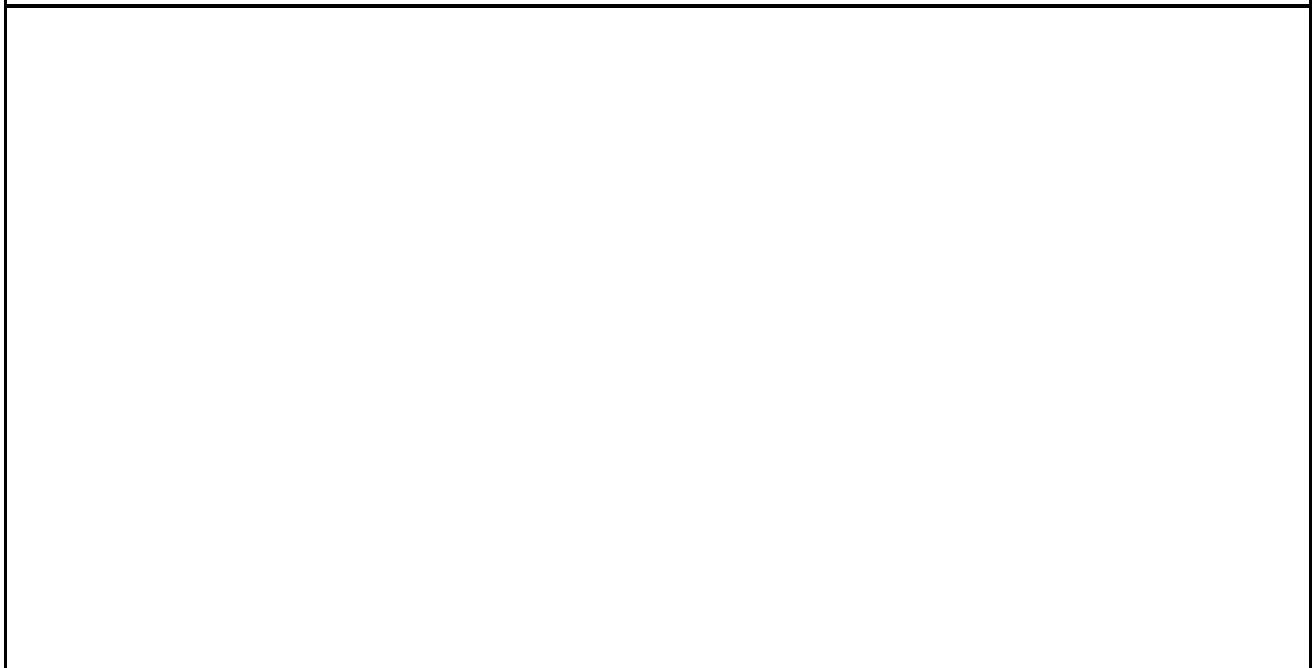


<sup>8</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuuld, Olanda, 1985

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-001-0280	<b>Foglio</b> 1            di            34	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
FIUME LAMBRO**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		2	di	34	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME LAMBRO</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE</b>	<b>16</b>
5.1	Erosione al fondo	16
5.2	Definizione della profondità di posa	20
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO</b>	<b>21</b>
6.1	Verifica del gradiente critico	22
6.2	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	23
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>26</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS</b>	<b>27</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>33</b>
	<b>ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE</b>	<b>34</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		3	di	34	

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Fiume Lambro, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo fluviale e al fine di evitare opere provvisorie e di ripristino impegnative, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica TOC. Le postazioni di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 200 m dall'alveo inciso del fiume. La profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 8,00 m. Una volta terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta le postazioni di spinta e di arrivo verranno interrate e ripristinate, per cui ad opera finita l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con l'asta idraulica e con i relativi deflussi.

L'attraversamento del fiume è ubicato in una zona ove il corso d'acqua segna il confine tra i comuni di Cerro al Lambro (MI) e San Zenone al Lambro (MI), distinta rispettivamente ai F. 10 e F. 5 del NCT dei comuni interessati.

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito degli eventi di piena, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento per il fondo alveo e le eventuali arginature presenti.

Verrà verificata in tal modo anche la compatibilità delle opere con le previsioni del PAI.

Per la determinazione della portata di progetto si è fatto riferimento alla "Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica" ed in particolare alle tabelle 6 e 43 riguardanti il Lambro.

Dalla cartografia per la determinazione delle fasce fluviali, *Foglio 140, Sez. IV – Lodi Vecchio, Adda 06 - Lambro 04*, si evince in particolare che l'attraversamento in progetto ricade tra le sezioni 41 e 40.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 4 di 34					

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita con la portata corrispondente ai vari tempi di ritorno riportati nelle tabelle suddette, nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

Per il reperimento dei dati necessari allo studio in oggetto si è fatto riferimento ai seguenti documenti degli strumenti di pianificazione vigenti:

- Piano Stralcio dell'Autorità di bacino del Fiume Po;
- Cartografia allegata al PAI.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	5	di	34	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il fiume Lambro nasce dai monti del gruppo del San Primo (Triangolo Lariano), nell'area di Piano Rancio nel comune di Magreglio con una sorgente di tipo carsico.

Il fiume ha un regime tipicamente pre-alpino con massimi di portata autunnali e primaverili e magre estive e invernali. La sua portata media naturale nel tratto milanese è abbastanza modesta con circa 5,8 m<sup>3</sup>/s di portata media che diventano addirittura 5 m<sup>3</sup>/s presso la foce nel Po a causa dei prelievi.

Il Lambro tuttavia può subire notevolissimi sbalzi di portata durante tutto l'anno, toccando nel basso corso anche valori medi di 40 m<sup>3</sup>/s. Tale circostanza è da attribuirsi principalmente alla pesante urbanizzazione che caratterizza il territorio del bacino, che, riducendo la permeabilità dei suoli ed aumentando la velocità di scorrimento, produce sulla rete idrografica dei picchi di piena di particolare intensità. Gli ultimi eventi calamitosi per il bacino del Lambro si sono verificati nel 2002 (ove sono state interessate ampie zone della città di Monza, del monzese e di molti centri della Brianza) e nel 2010, quando è stata interessate alcune zone di Milano, entrambi comunque in zone poste sensibilmente a monte dell'area di intervento.



Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (da Google Earth 2012)



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 6 di 34				

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Dalla tabella 6 e 43 della Direttiva citata in premessa si ricavano i seguenti dati di interesse:

Prog.	Sezione	Quota idrometrica	Q <sub>100</sub>	Q <sub>200</sub>	Q <sub>500</sub>
70.636	076	114,80	490	550	630
100.600	041	71,97			
101.400	040	71,97			
137.400	1	52	950	1080	1200

*Tab. 1 (tratta da tabelle 6 e 43 della Direttiva )*

Poiché le due sezioni tra cui cade l'attraversamento da rimuovere sono collocate a circa un terzo della distanza tra due sezioni di portata nota, si sono determinati i valori di portata da applicare nel successivo paragrafo 4, ipotizzando una variazione lineare della medesima, risulta quindi:

$$Q_{Tr100} = 643 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{Tr200} = 726 \text{ mc/sec}$$

$$Q_{Tr500} = 820 \text{ mc/sec}$$

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-280		Foglio	7	di	34	-

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL FIUME LAMBRO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 140 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

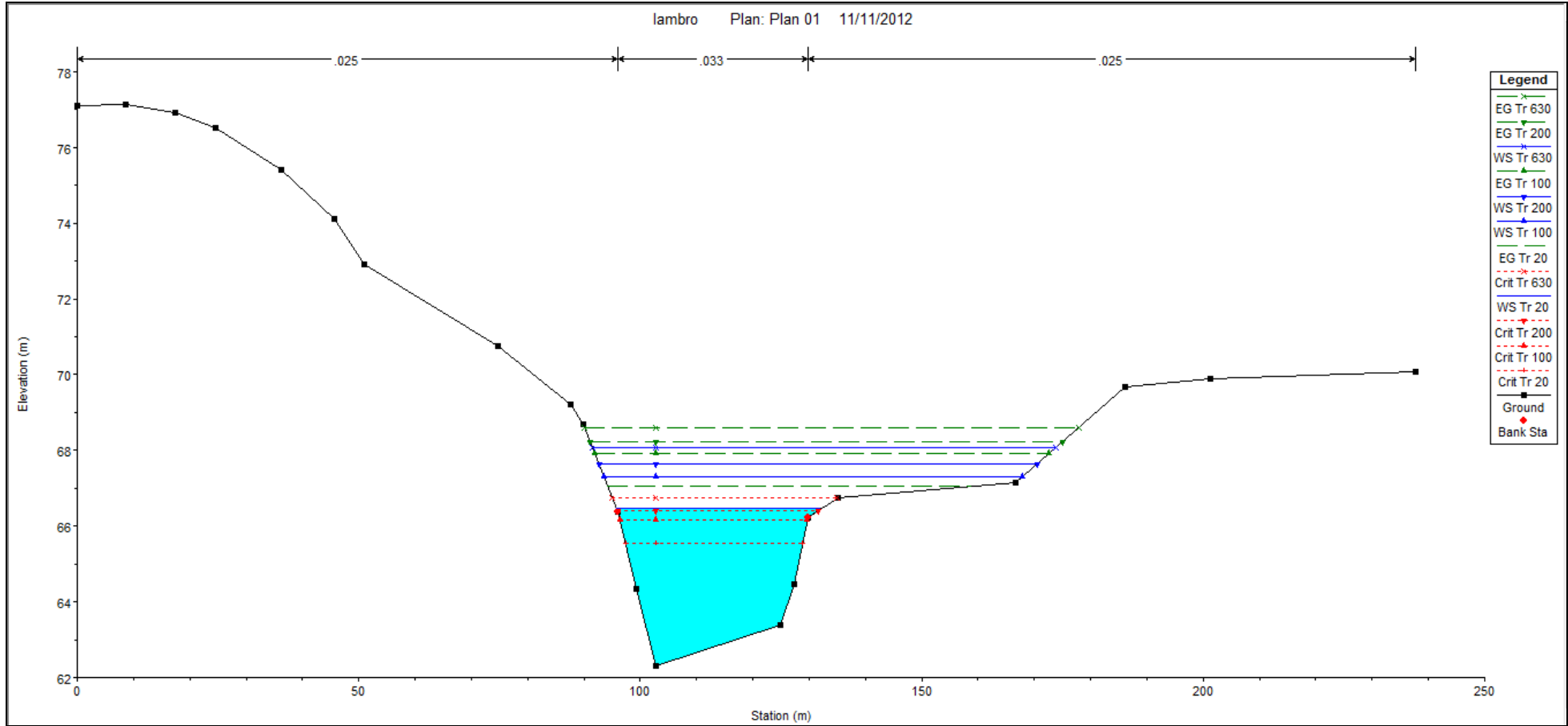
Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva citata che sono riassunti nella seguente tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 2 m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 2: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
	Foglio 8 di 34					



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>					
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00			N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-280	Foglio 9 di 34				-

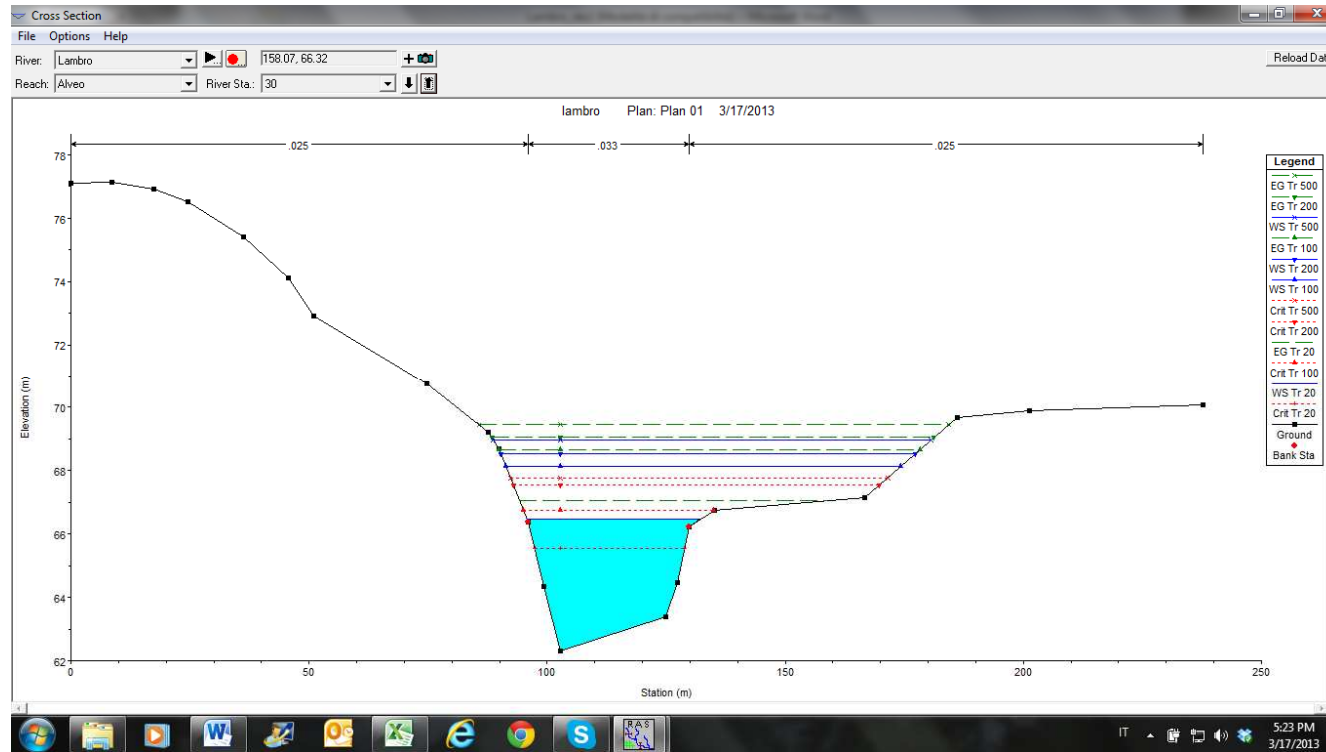
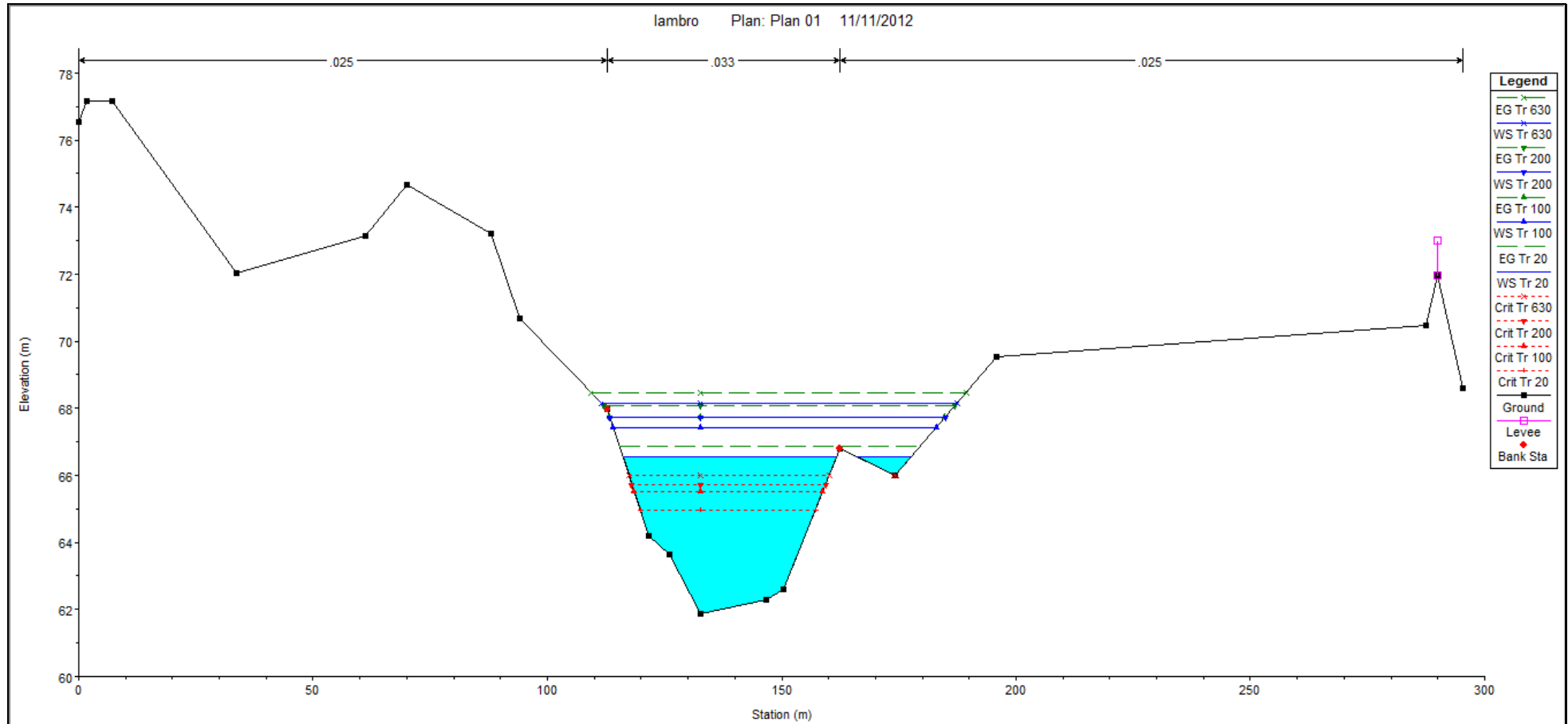


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-280	Foglio 10 di 34					-



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>					
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00			N° Doc. Cliente:
	Foglio 11 di 34				-

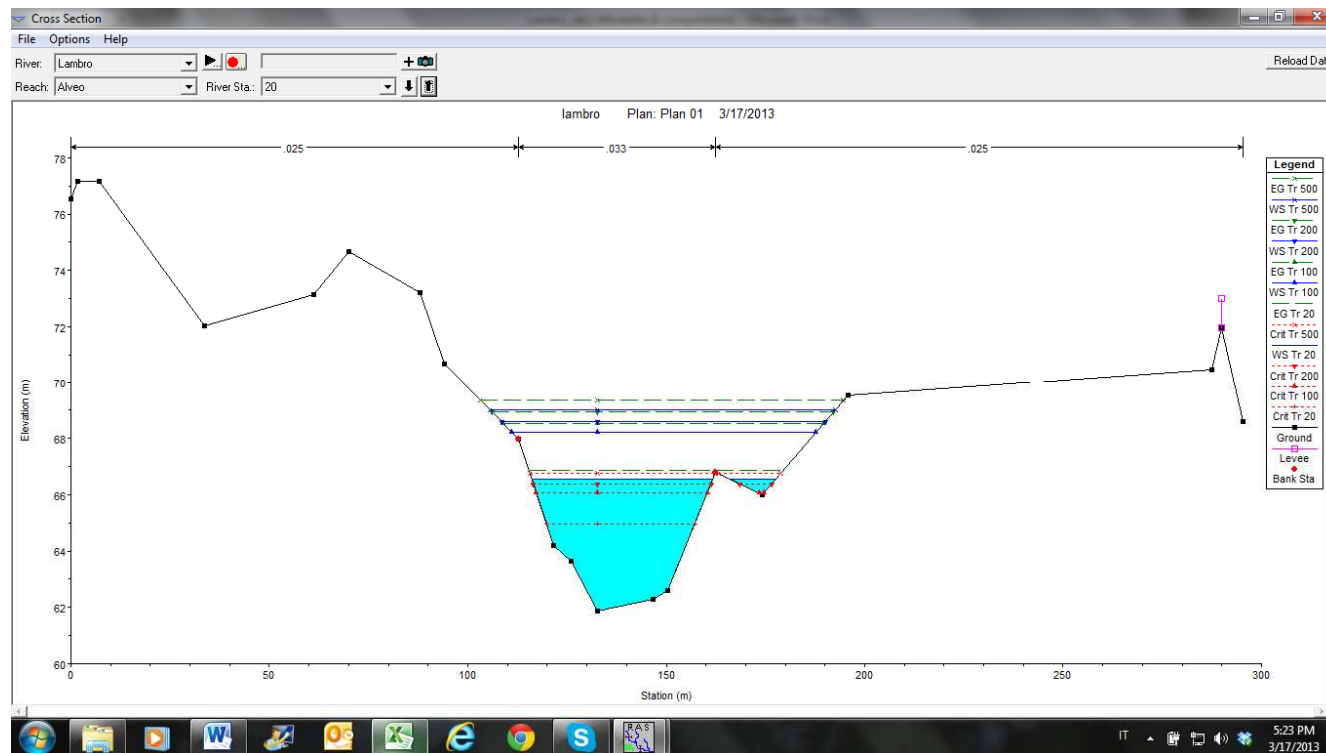
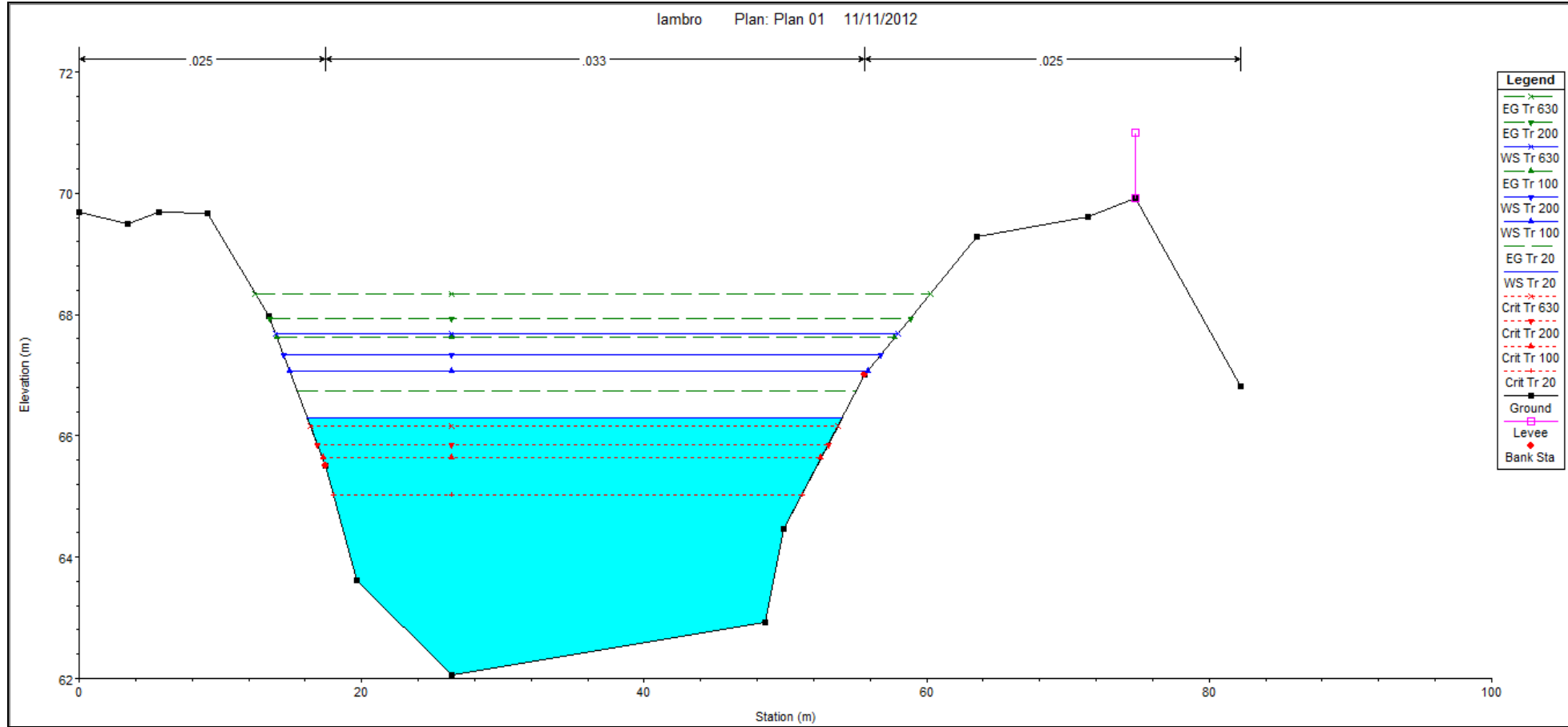


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-280	Foglio 12 di 34			-		



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
	Foglio 13 di 34					

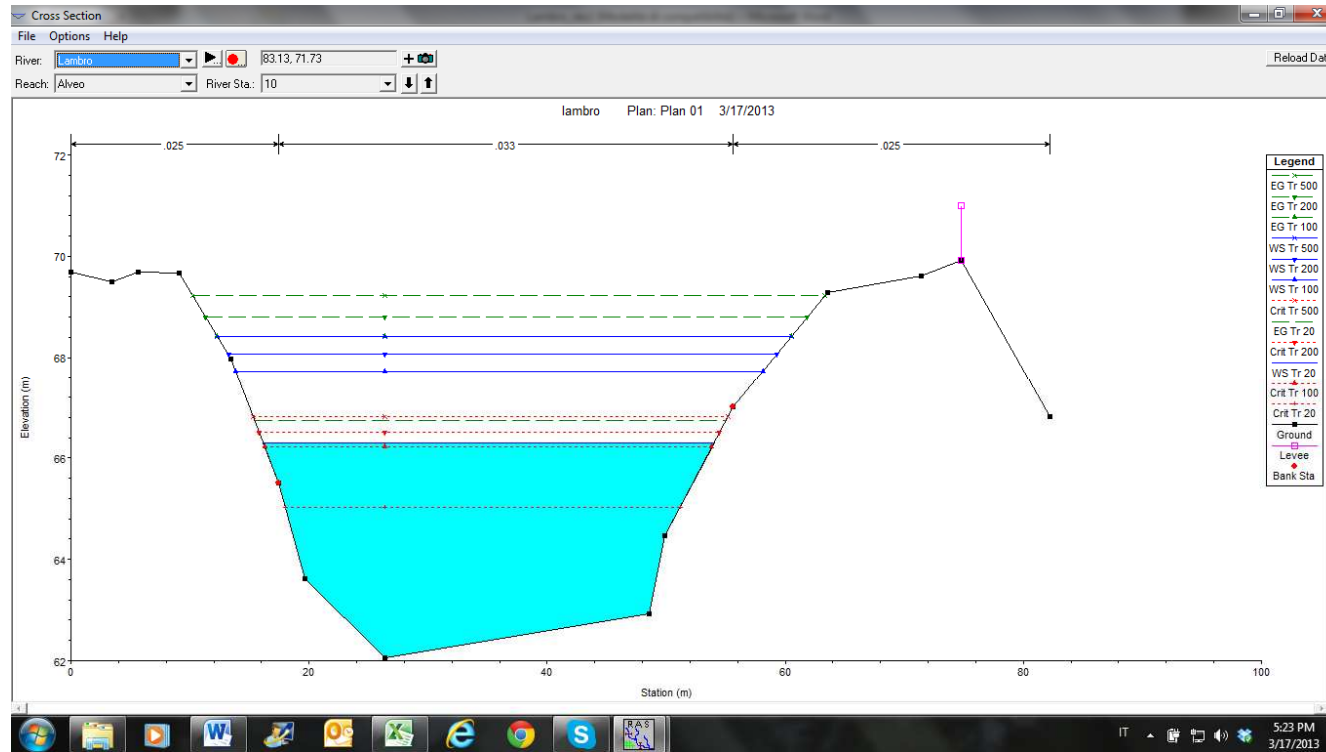


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato



METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar									
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO									
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-001-280		Foglio 14 di 34						-	

Sezione	Tr	Q [mc/sec]	h m.s.m.	h acqua [m.s.m.]	h critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ tot [N/mq]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	100	643	62.3	68.14	66.74	68.67	0.001728	3.42	214.11	82.92	0.5	2.51	42.53	75.84
30	200	726	62.3	68.55	67.54	69.04	0.001478	3.34	248.9	87.12	0.47	2.78	40.26	70.48
30	500	820	62.3	68.98	67.78	69.45	0.001278	3.28	287.37	91.95	0.44	3.04	38.1	66.04
20	100	643	61.87	68.21	66.06	68.54	0.001045	2.61	260.17	76.57	0.39	3.31	33.94	44.53
20	200	726	61.87	68.6	66.39	68.93	0.000966	2.65	290.83	81.6	0.38	3.48	32.93	44.7
20	500	820	61.87	69.01	66.76	69.35	0.000894	2.69	325.6	86.96	0.37	3.66	32.06	44.88
10	100	643	62.05	67.73	66.21	68.41	0.002103	3.67	177.89	44.29	0.55	3.77	77.82	88.59
10	200	726	62.05	68.06	66.51	68.8	0.002101	3.85	192.79	46.05	0.56	3.93	80.98	94.92
10	500	820	62.05	68.41	66.82	69.22	0.002101	4.03	209.25	48.18	0.56	4.08	84.06	101.74

Tabella 3: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO LAMBRO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-280	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 15 di 34					

E' opportuno evidenziare che, confrontando i risultati della tabella sopra riportata con quelli desunti dal Piano Stralcio dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, sintetizzati in Tab. 1, i livelli idrometrici previsti dal Pai nel tratto interessato dall'attraversamento sono sensibilmente superiori a quelli ottenuti dalla presente modellazione.

Tale diversità può essere collegata da un lato al diverso tipo di modello utilizzato (monodimensionale nel ns. caso, bidimensionale nel caso del PAI), dall'altro al fatto che l'estensione del rilievo disponibile nel caso in esame, limitato alla zona di possibile interferenza delle opere in progetto con l'alveo fluviale, non consente di valutare possibili effetti di rigurgito dovuti a restringimenti o ostacoli che possono essere presenti più a valle. Allo stesso modo non si può escludere che la differenza riscontrata sia collegabile al fatto che il rilievo di dettaglio, eseguito a livello locale a corredo del progetto, consenta una migliore rappresentazione dell'andamento d'alveo e delle zone di golena in tale tratto e, conseguentemente, una più precisa definizione dei livelli idrici in caso di piena.

Preme sottolineare, tuttavia, che tale non perfetta rispondenza dei livelli idrici non inficia i risultati delle calcolazioni di cui ai paragrafi successivi e questo sia in ragione dei coefficienti di sicurezza assunti che, soprattutto, del fatto che in generale un aumento del livello idrometrico (e conseguentemente della larghezza del pelo libero e dell'area) a parità di portata non determina una sostanziale variazione dei valori calcolati o, in alcuni casi, ne produce una diminuzione.

Il calcolo eseguito è quindi a favore di sicurezza.

Nell'unico caso in cui, tra quelli analizzati, il risultato dipende dal solo livello idrico, come nel caso della verifica di cui al paragrafo 6.2, si è proceduto al calcolo con i due differenti livelli (Pai e modellazione locale).

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 16 di 34				

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche dell'evento con tempo di ritorno  $Tr_{200}$  anni.

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2 e 5.

Per quanto riguarda il punto 2 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, il corso d'acqua presenta la tipica conformazione a meandri, tipica dei fiumi "maturi" con pendenze di fondo molto basse e, pertanto, sostanzialmente in equilibrio.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame, la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla formazione di locali depositi di materiale più fine che, determinando un aumento locale della velocità a causa della minore scabrezza, potrebbe innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio		17	di	34	

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , per tr 200 anni, risulta:

$$S_{\max Tr200} = 2,70 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che le formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 2,00, risulta pertanto:

$$S_{\max buche} = 2,70 * 2,00 = 5,39 \text{ m}$$

### Caso 3:

L'attraversamento in progetto cade circa a metà di un'ansa del fiume, risultano quindi applicabili le formule empiriche per la determinazione dell'erosione in curva.

Va evidenziato che trattandosi di formule sperimentali, la loro validità è fortemente legata alle condizioni al contorno utilizzate per la loro determinazione, pertanto si è proceduto utilizzando due delle principali espressioni reperibili in letteratura, in modo da poter confrontare i risultati, e si sono adottati opportuni coefficienti di sicurezza.

Secondo la relazione di Seminara e Tubino (1989), nell'ipotesi di trasporto al fondo dominante, sedimenti omogenei e raggio di curvatura costante, la profondità massima di scavo si può ricavare dall'espressione:

$$\eta_{\max} = Yd_o \frac{b_f}{4r_c}$$

Dove:

- $b_f$  è la larghezza del fondo alveo;
- $Y$  il tirante idrico della sezione all'inizio della curva
- $r_c$  è il raggio di curvatura

---

<sup>1</sup>  $S_{\max prog} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con H= carico totale

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 18	di 34			

- $d_0$  è un coefficiente che si ricava da tabelle sperimentali (Vedi Annesso 2) in funzione del numero di Shields  $\theta$  e del rapporto  $D/Y$ , con  $D$  diametro rappresentativo del sedimento.

Un'altra espressione per la determinazione della massima profondità di erosione è fornita da Galay et al. (1987) che per alvei in ghiaia ed angolo interno intorno a  $100^\circ$  e pone:

$$h_g = h_{med} \left( 0,9 + 3,7 \frac{b_f}{r_c} \right)$$

Mentre per angoli al centro inferiori a  $60^\circ$  risulta :

$$h_g = h_{med} \left( 1,2 + \frac{B}{R} \right)$$

Dove, oltre ai simboli già visti in precedenza

- $h_g$  è il tirante idraulico in corrispondenza del gorgo;
- $h_{med}$  è la profondità media nella sezione di attacco della curva (calcolata come rapporto tra l'area e la larghezza del pelo libero);

dall'applicazione delle formule suddette si sono ottenuti i risultati riportati nella seguente tabella (in cui il significato e le unità di misura dei vari simboli utilizzato è indicato in precedenza):

	<b>Tr 200</b>
<b>bf</b>	38
<b>rc</b>	191
<b>Y</b>	6,73
<b>h<sub>med</sub></b>	3,56
<b>D</b>	0,009
<b>do</b>	16
<b>μ</b>	5,35
<b>hg</b>	5,83
<b>Med.</b>	<b>5,59</b>

*Tabella 4: profondità di scavo prevedibile per la presenza di curve*

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 19 di 34					

La profondità ipotizzata è pertanto caratterizzata da un coefficiente di sicurezza pari ad 1,43 rispetto al valore medio sopra calcolato, si ritiene quindi la profondità dotata sufficientemente cautelativa.

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{med}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{bmax} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{max} = 0,50 \div 0,57 * H_{bmax}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0280	Foglio		20	di	34	

	Tr 200
<b>bf</b>	38
<b>Y</b>	6,73
<b>D</b>	0,009
<b><math>\beta</math></b>	2,82
<b><math>\beta_c</math></b>	12,5
<b>H</b>	No
<b><math>\mu_{max}</math></b>	No

Tabella 5: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene pertanto che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 3, erosione dovuta alla presenza di curve, poiché la tecnica esecutiva ipotizzata prevede di raggiungere una profondità di 8,00 m dal punto più depresso del fondo alveo, corrispondente ad un coefficiente di sicurezza di 1,43, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

---

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	21	di	34	

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici o modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo, ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica (il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere). Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 22 di 34					

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica del percorso di filtrazione equivalente

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>3</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 4)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>4</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Nel caso in esame tuttavia, il fiume scorre in un alveo inciso rispetto al piano campagna, per cui a regime, anche ipotizzando un livello idrico pari alla piena con Tr 200 anni, non ci sarà alcuna differenza di carico idraulico che possa innescare detto fenomeno.

La quota raggiunta dalla piena di progetto infatti, come risulta dalla precedente tabella 3) è 67,75 m.s.m., mentre la quota del piano campagna è, in prossimità dell'attraversamento, 68,31 m.s.m.

La verifica del presente paragrafo sarebbe in tal caso superflua.

3 Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un'ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

4 Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all'80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 23 di 34					

Tuttavia, a titolo cautelativo, si esegue la presente verifica assumendo il livello di piena previsto dal PAI, superiore a quello calcolato con la modellazione monodimensionale, pari a 71,86 m.s.m.<sup>5</sup>

In tal modo si viene ad avere una differenza di livello rispetto al piano campagna in corrispondenza dell'argine destro, di 3,55 m.

Nel caso in esame, si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

$\Delta h$ [m]	3,55
$L_{1-2-3}$ [m]	22,26
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	1,5 <sup>6</sup>
$i_{cr} / i$	2,51

Tabella 6: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

5 Valore ottenuto come media dei tiranti idrici previsti dal PAI nella sezione a monte ed a valle di quella dell'attraversamento, come desumibili da tabella 3

6 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni scavo, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio		24	di	34	

e

$$L_1 \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a  $45^\circ$ ) vengono inserite nel conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

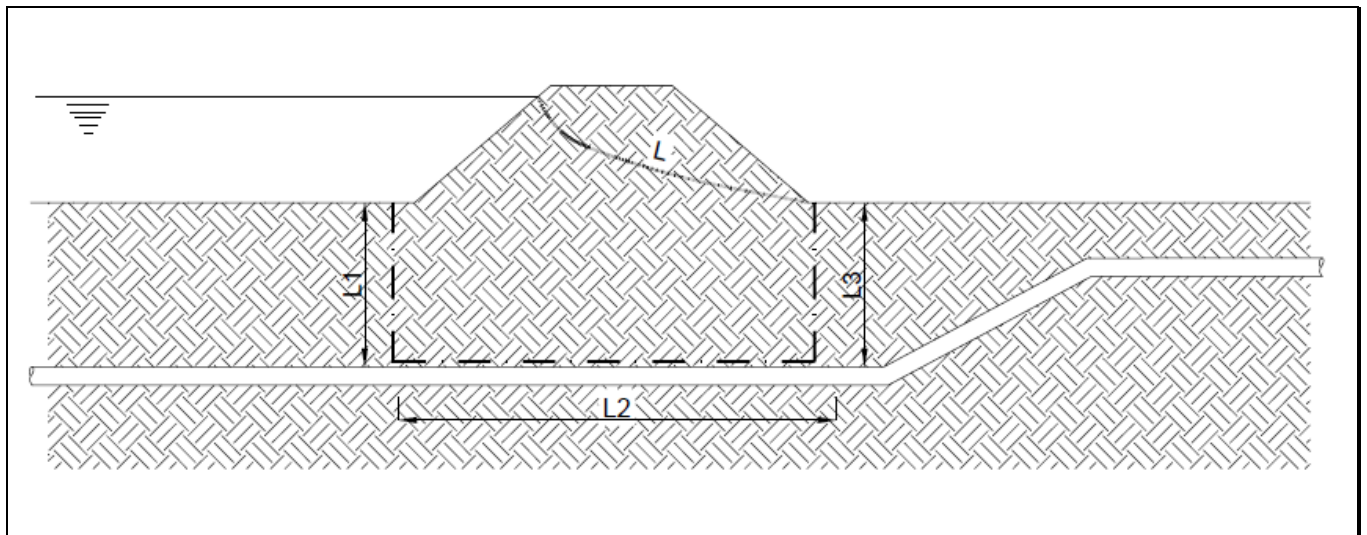


Figura 4: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 25 di 34					

Con le medesime ipotesi di cui al paragrafo precedente risulta quindi:

	<b>Tr200 PAI</b>
L1 [m]	9,46
L2 [m]	4,00
L3 [m]	8,80
L [m]	8,00
0,1xL	0,80
Lt>1,2L	Ok

*Tabella 7: verifica del percorso equivalente*

Essendo sempre  $L1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$  anche in questo caso la verifica è ampiamente soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 26 di 34				

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Fiume Lambro che, si ricorda, verrà eseguito mediate realizzazione TOC ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 8,00.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle piene con Tr 200 anni con un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,43;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento sia nel breve che nel lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
Foglio 27 di 34						

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0280	Foglio 28 di 34					

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 29	di 34			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

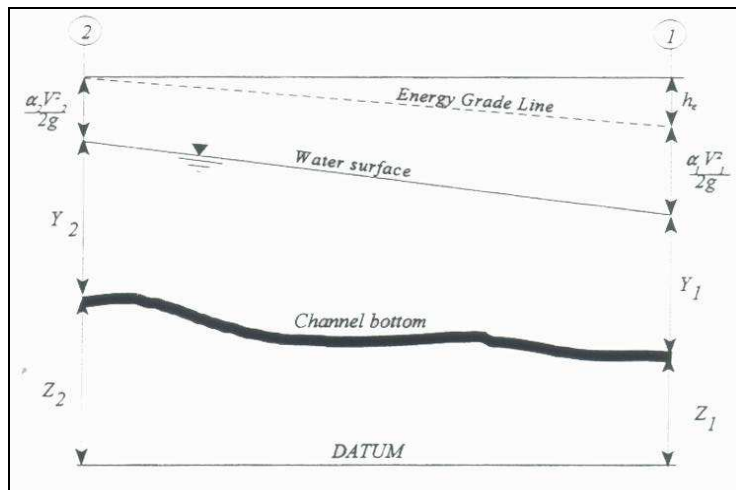


Fig. 1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 30	di 34			

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la gola di sinistra, il canale di magra e la gola di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	31	di	34	

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

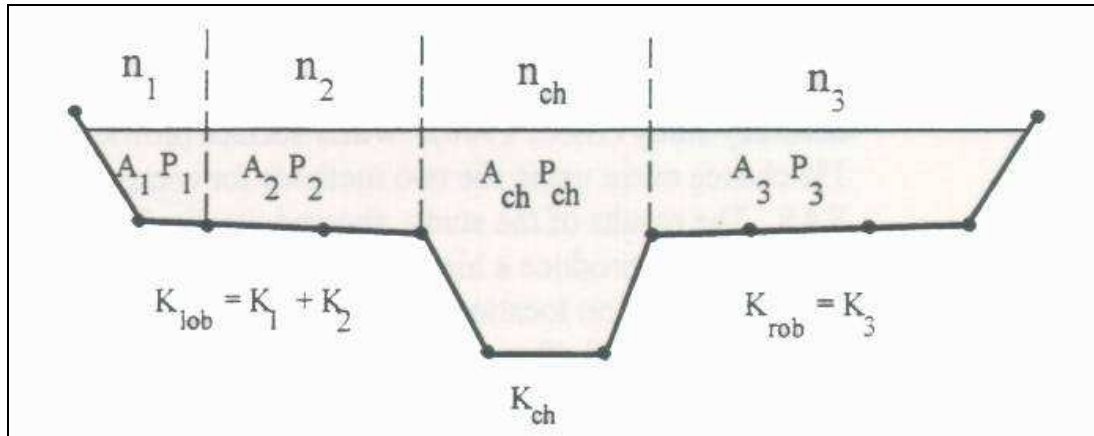


Fig.2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	32	di	34	

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

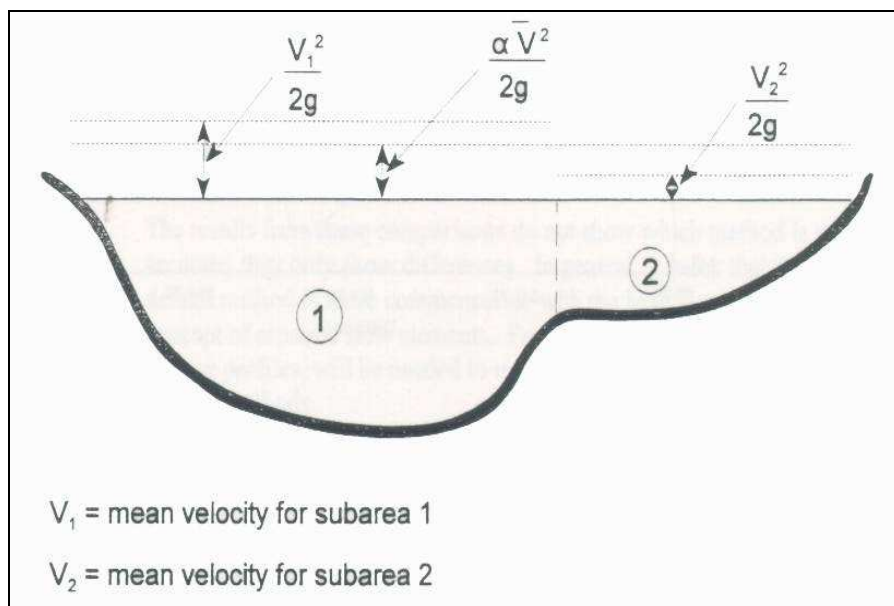
dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.



Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-001-0280	Foglio 33 di 34					

## ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI $d_0$ E $\beta_c$

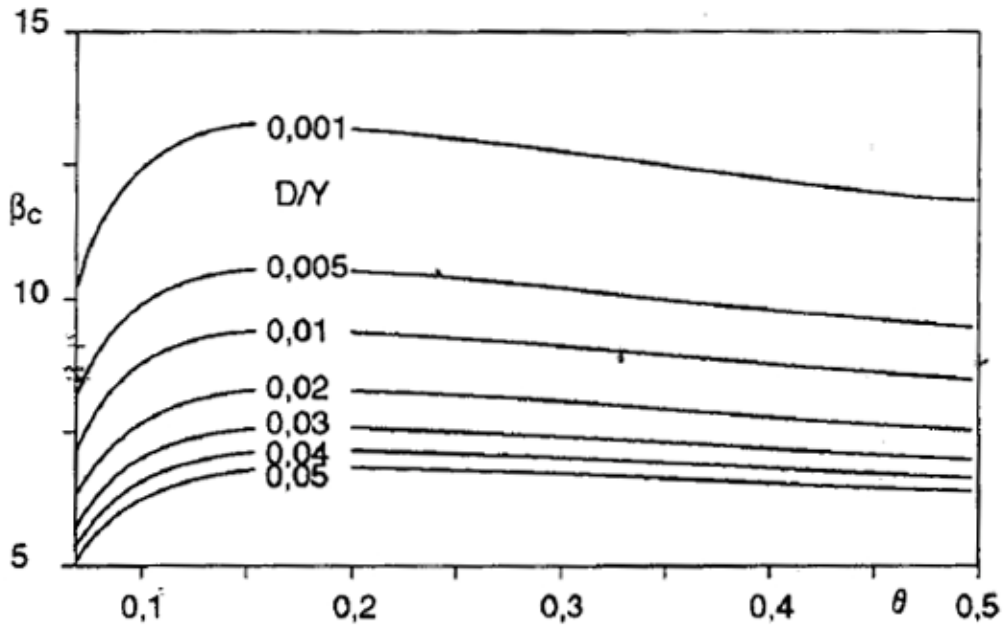


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^7$

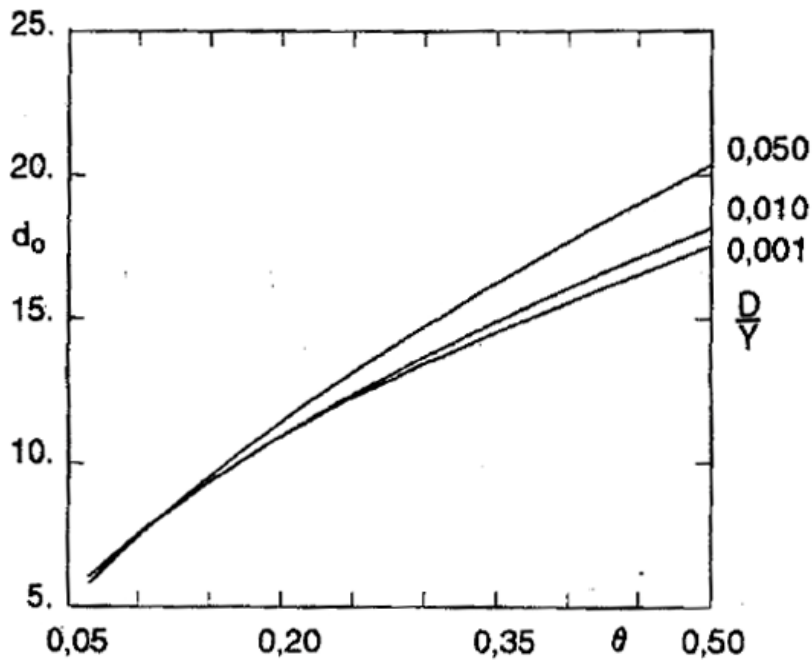


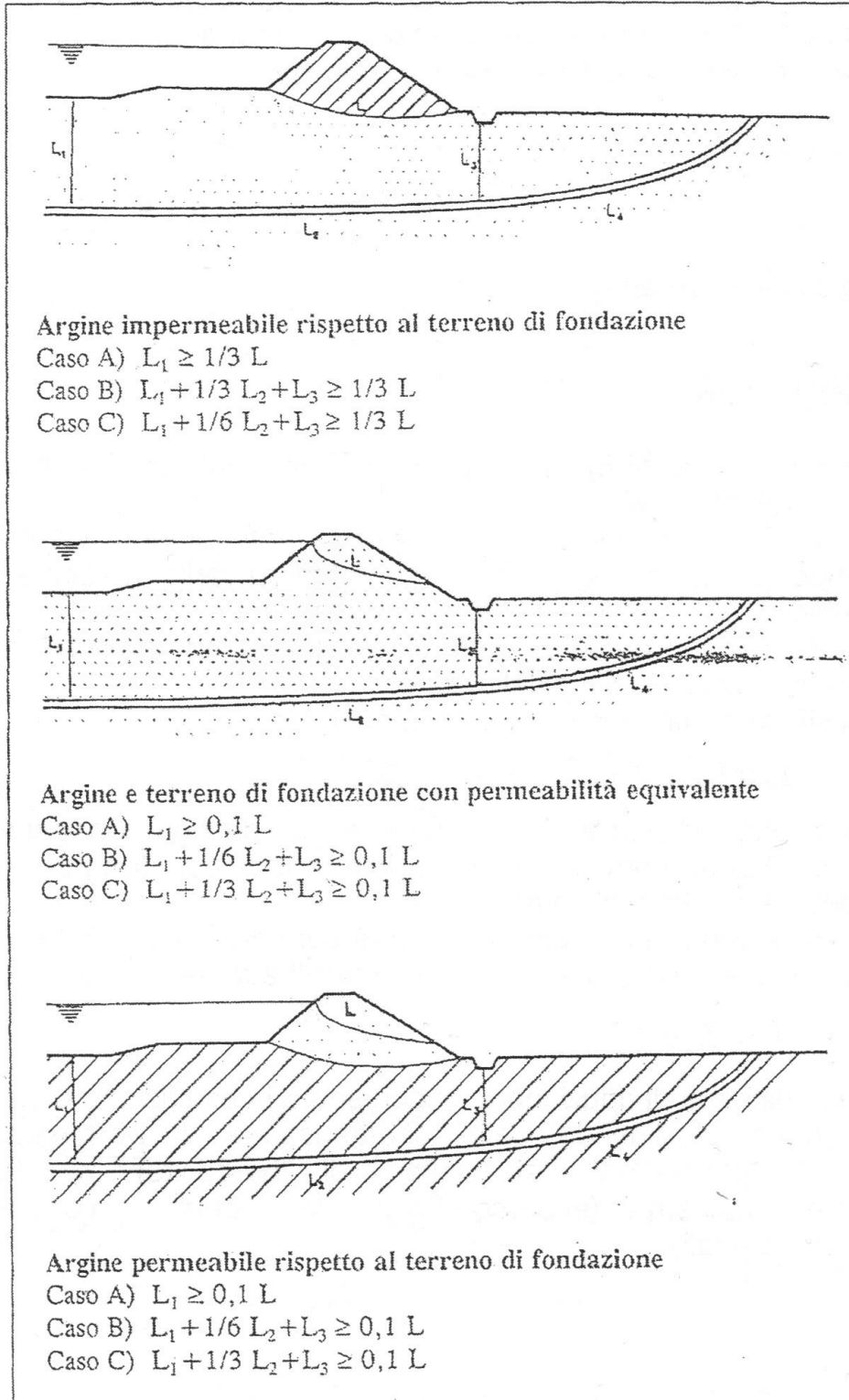
Tabella per la determinazione di  $d_0^8$

<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna



<sup>8</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

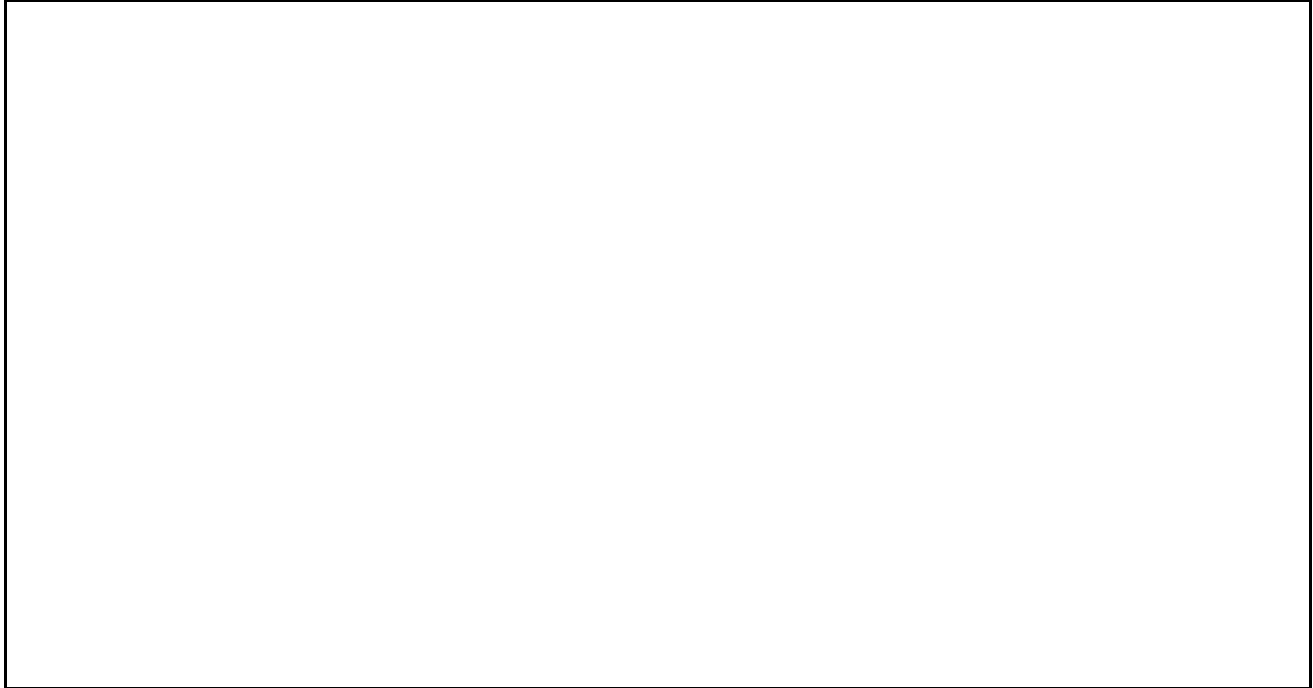
METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-001-0280	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 34 di 34					

### ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>9</sup>

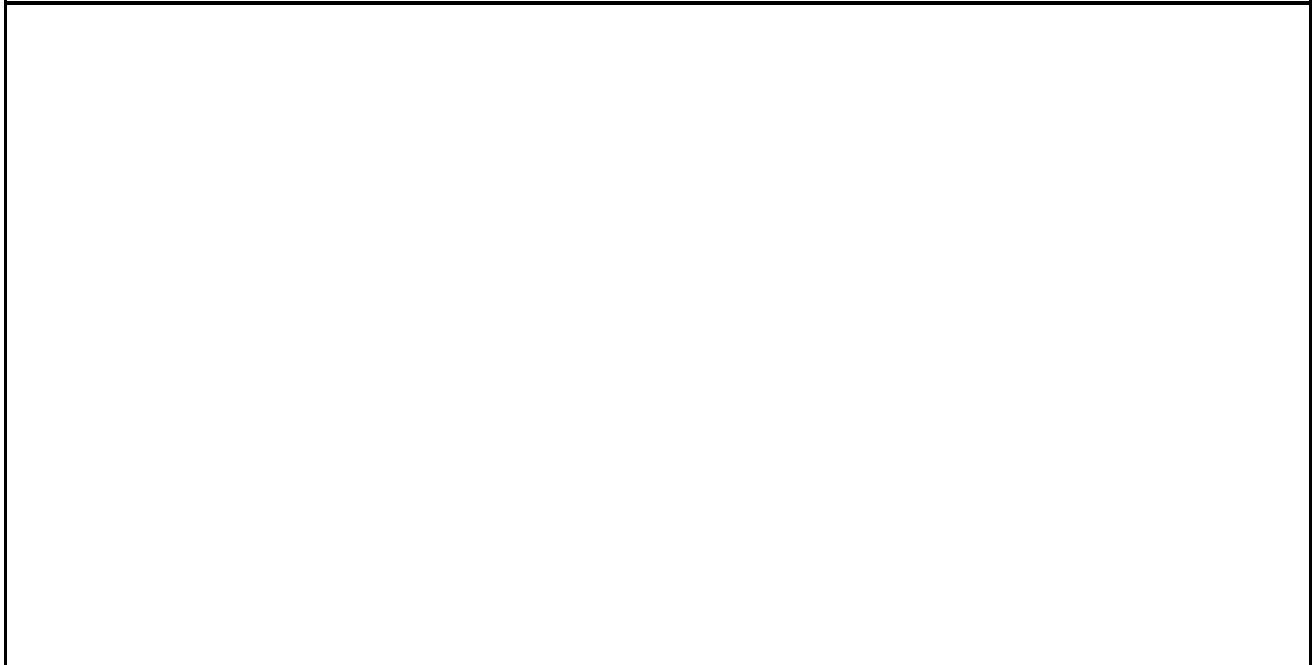


<sup>9</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuild, Olanda, 1985

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA</b> <b>DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-002-0251	<b>Foglio</b> 1        di        25	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA**  
**FIUME LAMBRO MERIDIONALE**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		2	di		25

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL LAMBRO MERIDIONALE</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>Erosione al fondo</b>	<b>12</b>
<b>5.2</b>	<b>Definizione della profondità di posa</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>18</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS</b>	<b>19</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>25</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		3	di	25	

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Lambro Meridionale, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo fluviale che, data la sua natura di scaricatore di piena e di ricettore di acque reflue depurate è caratterizzato da presenza di portate in tutti i periodi dell'anno si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica del TOC .

Tale soluzione è resa altresì necessaria dalla presenza, in corrispondenza del punto individuato per l'attraversamento, di un'ansa relitta del medesimo corso d'acqua, situazione che renderebbe l'attraversamento con una tecnica tradizionale eccessivamente oneroso.

Le postazioni di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 200 m dalle sponde dall'alveo inciso del fiume. La profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 8,00 m. terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le postazioni di spinta e di arrivo verranno interrato, per cui ad opera finita l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con l'asta idraulica e con i relativi deflussi.

L'attraversamento del Lambro Meridionale è ubicato in una zona distinta in dettaglio ai F. 1 e 6 del NCT del Comune di Landriano (PV).

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>							
<b>N°Doc. Ingegneria:</b> J01811-PPL-RE-002-0251	<b>Rev.:</b> 00						<b>N°Doc. Cliente:</b>
		Foglio 4 di 25					

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezza caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56'') DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	5	di	25	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Come accennato al paragrafo precedente il Lambro Meridionale è un corso d'acqua artificiale che si origina nel centro di Milano da uno scaricatore del Naviglio Grande. Nel suo primissimo tratto riceve le acque del Deviatore Olona e la portata in eccesso del naviglio Pavese, poi, proseguendo nel suo percorso, riceve le acque della Roggia Ticinello, emissario della Darsena di Porta Ticinese e parte delle acque depurate dell'impianto Milano-San Rocco. Scorre poi nelle campagne tra il Pavese e il Lodigiano, dove riceve la Roggia Taverna e dà origine, in sponda sinistra, alla roggia Bolognina. Riceve il ritorno della roggia Pizzabrasa e la roggia Carlesca entrambe arricchite a Rozzano da acque depurate a San Rocco. Confluisce nel Lambro Sant'Angelo Lodigiano.



*Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto*

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio 6 di 25				

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa, il Lambro Meridionale nasce come scaricatore di acque reflue e meteoriche e, successivamente, riceve le acque da alcuni canali anch'essi artificiali.

Non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo bene in conto le finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si è proceduto alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto per portate superiori si avrebbe il superamento delle arginature con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 650,0 \text{ mc/sec}$$

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	7	di	25	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL LAMBRO MERIDIONALE

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 70 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tabella 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>					
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00			N° Doc. Cliente:
	Foglio 8 di 25				

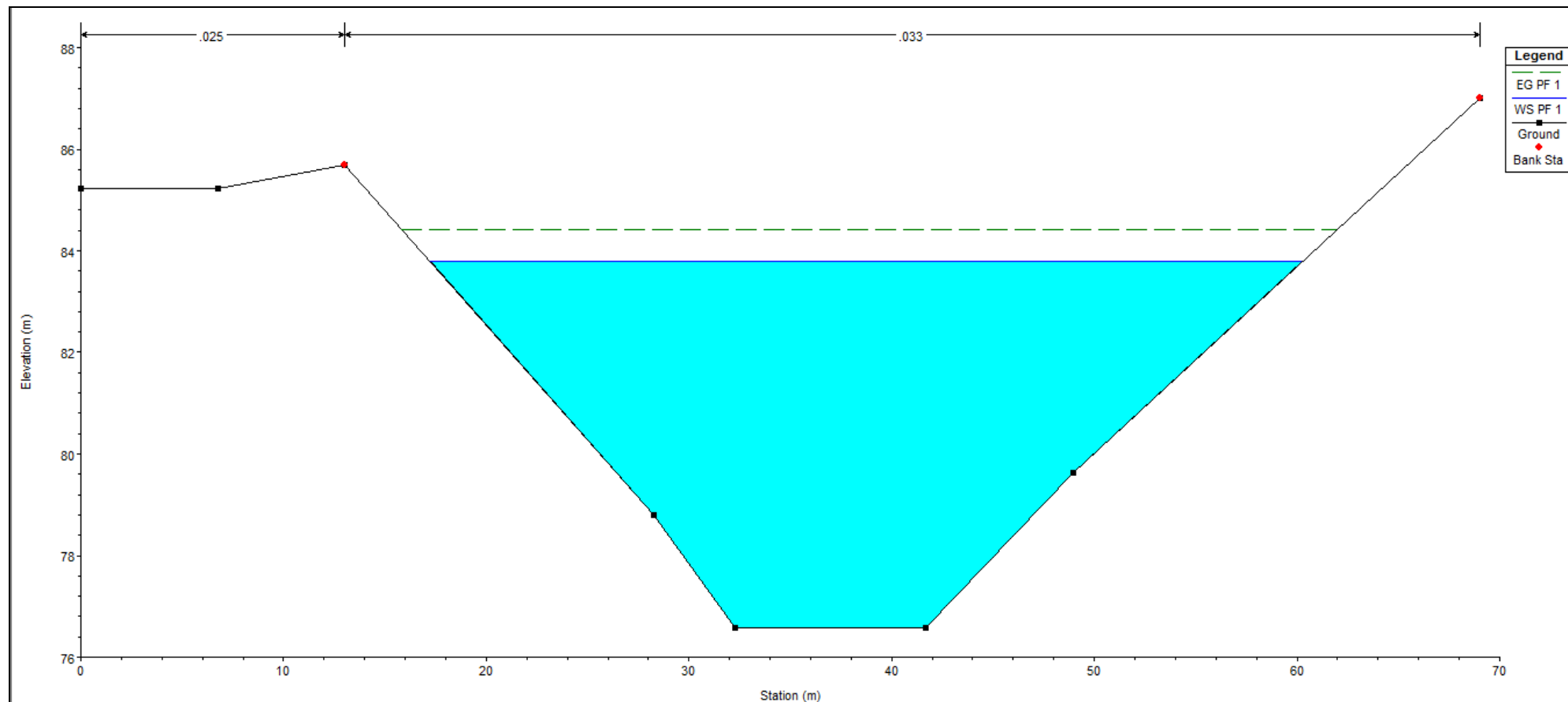


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio 9 di 25					

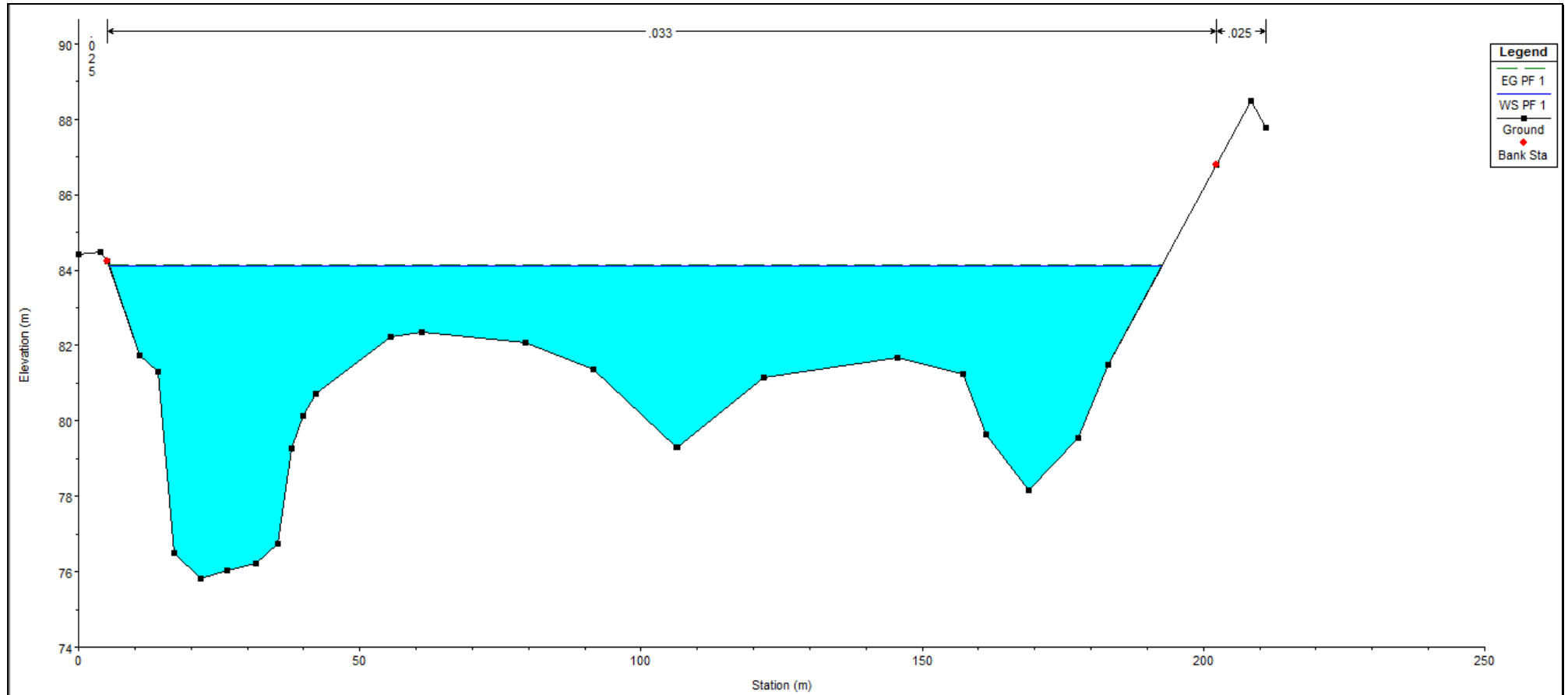


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>					
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00			N° Doc. Cliente:
	Foglio 10 di 25				

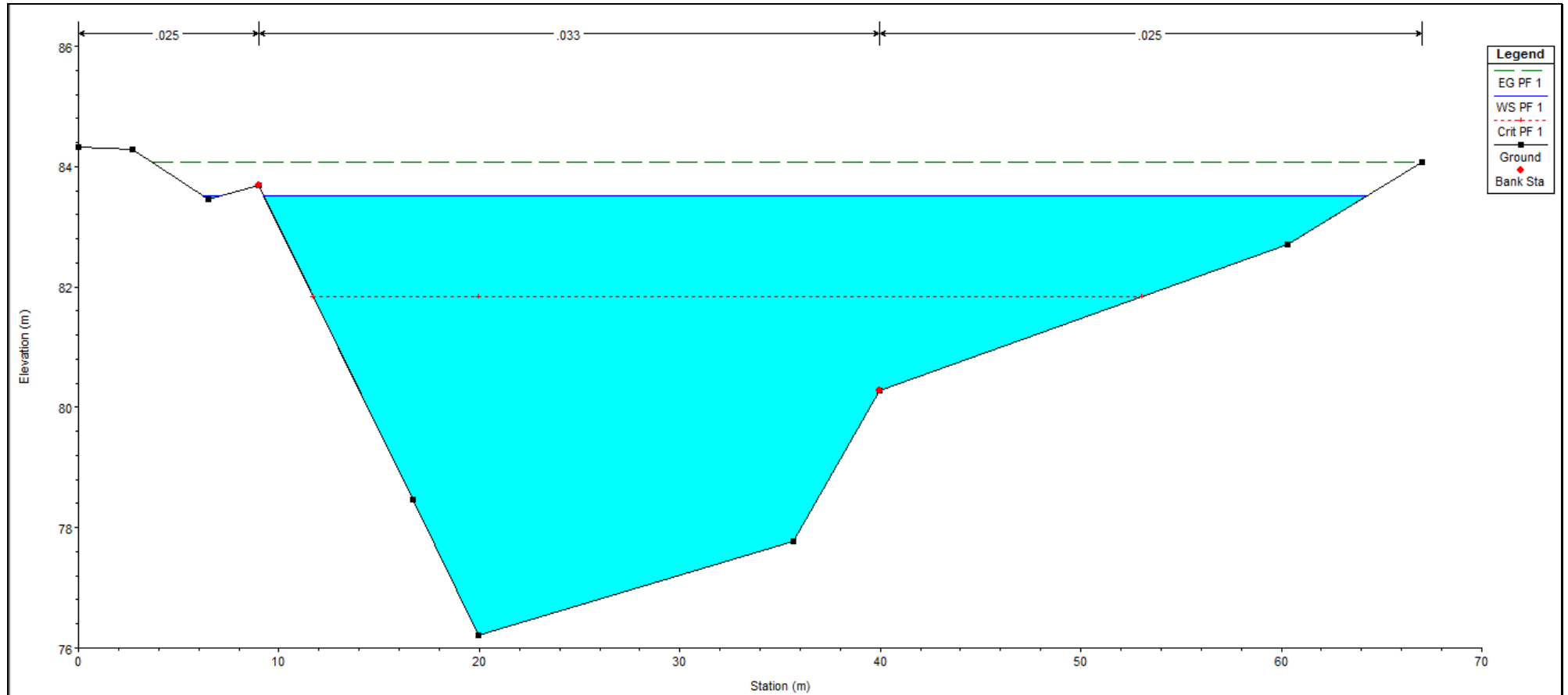


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>									
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>									
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-002-0251		Foglio 11 di 25							

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]	$\tau$ tot [N/mq]
30	650	76.57	83.78	75.05	84.41	0.002112	3.52	184.79	43.03	0.54	4.01	83.13	83.13
20	650	75.83	84.1		84.15	0.000206	0.99	659.7	187.06	0.17	3.41	6.89	6.89
10	650	76.22	83.52	74.91	84.07	0.001602	3.43	203.27	56	0.48	3.43	74.79	53.91

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		12	di		25

## **5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE**

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata sopra calcolata (a piene rive).

### **5.1 Erosione al fondo**

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2 e 5.

Infatti, per quanto riguarda il punto 2, nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, il corso d'acqua presenta la tipica conformazione a meandri, tipica degli alvei "maturi" con pendenze di fondo molto basse e, pertanto sostanzialmente in equilibrio.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 13	di	25		

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 2,27 \text{ m}$$

Su tale valore, tuttavia, è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 2,00, risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 2,27 * 2,00 = 4,54 \text{ m}$$

### Caso 3:

L'attraversamento in progetto cade circa a metà di un'ampia curva del fiume, risultano quindi applicabili le formule empiriche per la determinazione dell'erosione in curva.

Va evidenziato che trattandosi di formule sperimentali, la loro validità è fortemente legata alle condizioni al contorno utilizzate per la loro determinazione, pertanto si è proceduto utilizzando due delle principali espressioni reperibili in letteratura, in modo da poter confrontare i risultati, e si sono adottati opportuni coefficienti di sicurezza.

Secondo la relazione di Seminara e Tubino (1989), nell'ipotesi di trasporto al fondo dominante, sedimenti omogenei e raggio di curvatura costante, la profondità massima di scavo si può ricavare dall'espressione:

$$\eta_{\max} = Yd_o \frac{b_f}{4r_c}$$

Dove:

- $b_f$  è la larghezza del fondo alveo;
- $Y$  il tirante idrico della sezione all'inizio della curva
- $r_c$  è il raggio di curvatura

---

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con H= carico totale

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio		14	di	25	

- $d_0$  è un coefficiente che si ricava da tabelle sperimentali (Vedi Annesso 2) in funzione del numero di Shields  $\theta$  e del rapporto  $D/Y$ , con  $D$  diametro rappresentativo del sedimento.

Un'altra espressione per la determinazione della massima profondità di posa è fornita da Galay et al. (1987) che per alvei in ghiaia ed angolo interno intorno a  $100^\circ$  e pone:

$$h_g = h_{med} \left( 0,9 + 3,7 \frac{b_f}{r_c} \right)$$

Mentre per angoli al centro inferiori a  $60^\circ$  risulta :

$$h_g = h_{med} \left( 1,2 + \frac{B}{R} \right)$$

Dove, oltre ai simboli già visti in precedenza

- $h_g$  è il tirante idraulico in corrispondenza del gorgo;
- $h_{med}$  è la profondità media nella sezione di attacco della curva (calcolata come rapporto tra l'area e la larghezza del pelo libero);

dall'applicazione delle formule suddette si sono ottenuti i risultati riportati nella seguente tabella (in cui il significato e le unità di misura dei vari simboli utilizzato è indicato in precedenza):

<b>bf</b>	25
<b>rc</b>	330
<b>Y</b>	8,27
<b>h<sub>med</sub></b>	3,53
<b>D</b>	0,005
<b>do</b>	17,0
<b>μ</b>	2,66
<b>hg</b>	4,16
<b>Med.</b>	<b>3,41</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di curve

Adottando un coefficiente di sicurezza pari ad 1,5 applicato al maggiore dei valori sopra calcolati si ottiene:

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	25	

$$S_{\max \text{ curva}} = 4,16 * 1,50 = 6,24 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

---

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio		16	di	25	

<b>bf</b>	25,00
<b>Y</b>	8,27
<b>D</b>	0,005
<b><math>\beta</math></b>	1,51
<b><math>\beta_c</math></b>	9,0
<b>H</b>	<b>No</b>
<b><math>\mu_{max}</math></b>	<b>No</b>

Tabella 4: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta alla presenza di curve, pertanto la profondità minima di posa della condotta deve risultare **non inferiore a circa 6,24 m**; poiché il progetto prevede di posare il tubo con la generatrice superiore ad **una profondità di m. 8,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 17 di 25				

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo parzialmente o totalmente inciso.

Nel caso in esame in particolare, il fiume scorre in un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, per cui a regime, anche ipotizzando un livello idrico pari alla massima portata transitabile, si verrà ad avere una differenza di carico idraulico pressochè nulla che possa innescare detto fenomeno.

La quota raggiunta dalla piena di progetto infatti, come risulta dalla Tabella 2 sopra riportata, è 84,10 m.s.m., mentre la minima quota del piano campagna è, in prossimità dell'attraversamento 84,08 m.s.m.

La verifica del presente paragrafo è pertanto superflua.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 18 di 25					

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Lambro Meridionale che, si ricorda, verrà eseguito mediante realizzazione di una TOC ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 8,00.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente anni con un coefficiente di sicurezza superiore a 1,50;
- che la geometria del corso d'acqua nella zona dell'attraversamento, caratterizzata da un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, consente di escludere qualsiasi rischio di sifonamento sia nel breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	19	di	25	

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio 20 di 25					

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 21	di 25			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

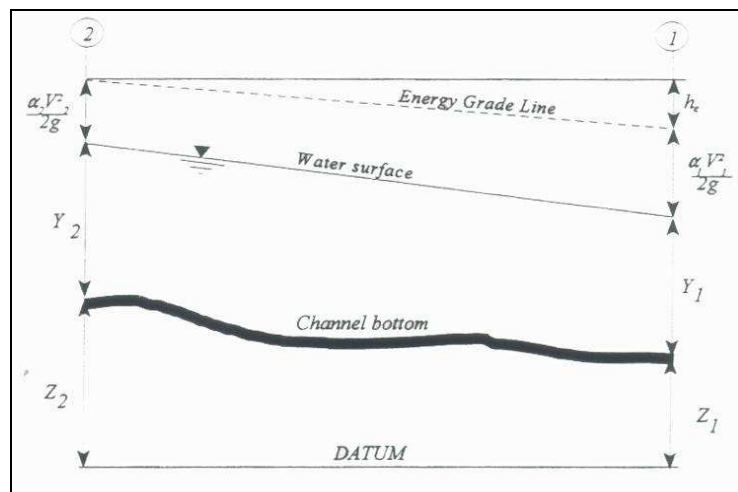


Fig. 1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio 22 di 25					

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la gola di sinistra, il canale di magra e la gola di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 23	di	25		

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

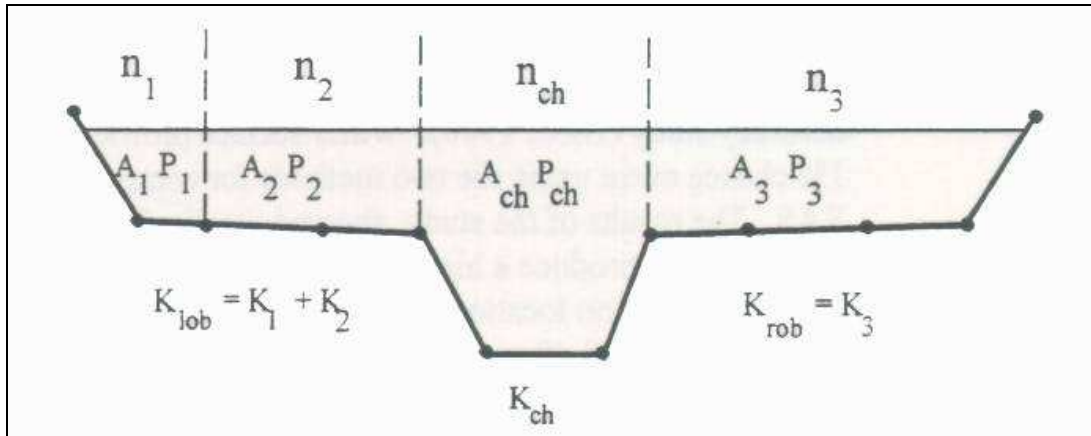


Fig. 2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0251	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
Foglio 24 di 25						

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

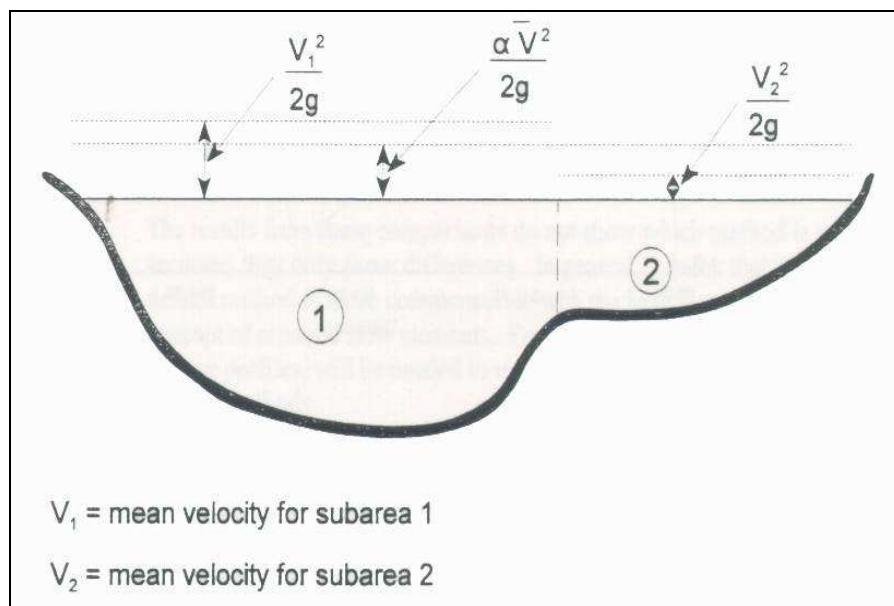


Fig. 3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0251	Foglio 25 di 25					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

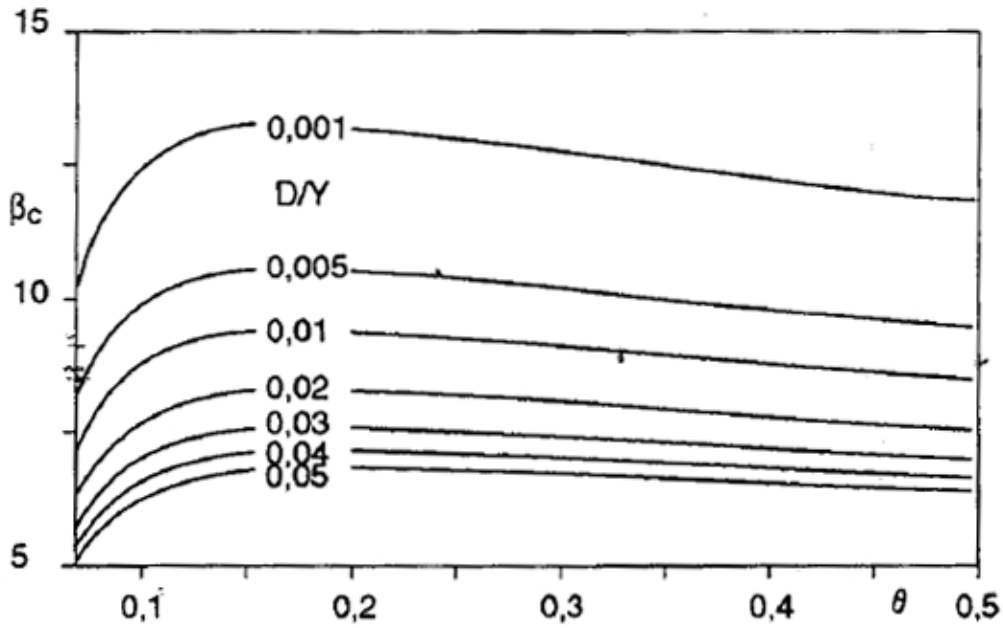


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^3$

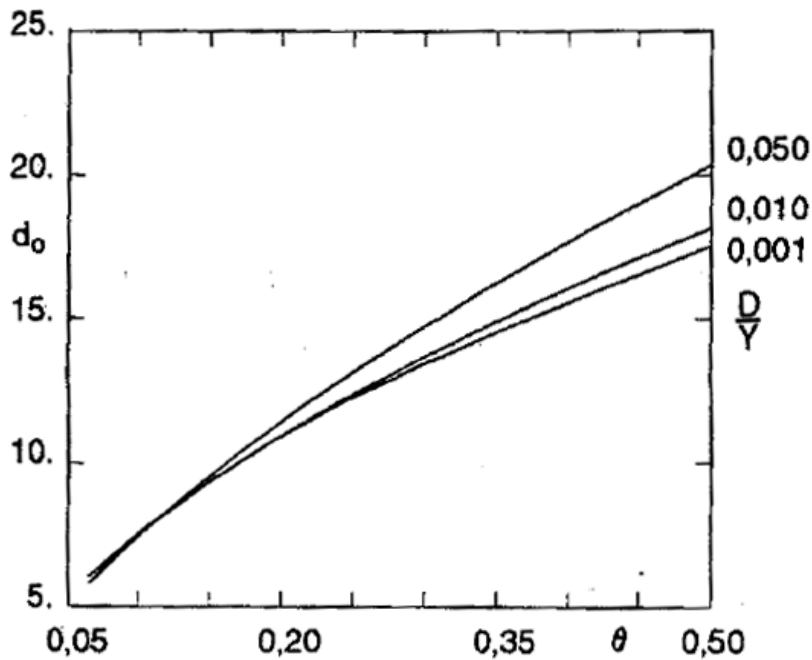


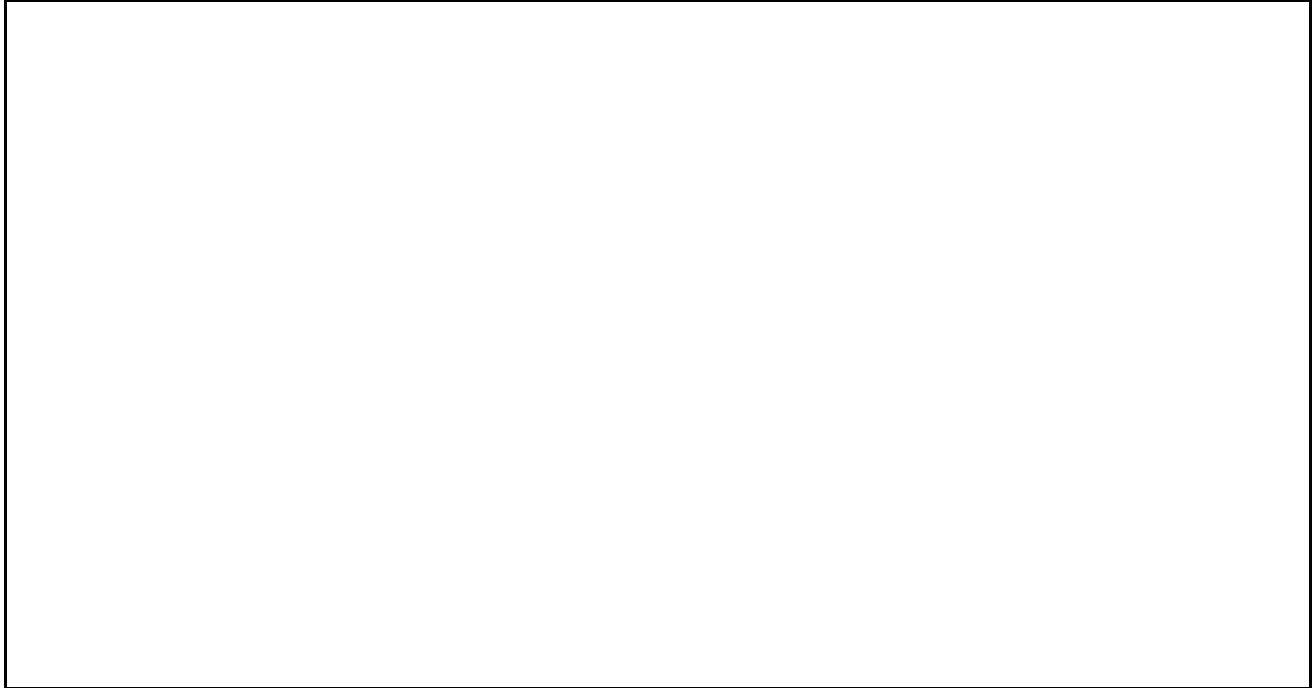


Tabella per la determinazione di  $d_0^4$

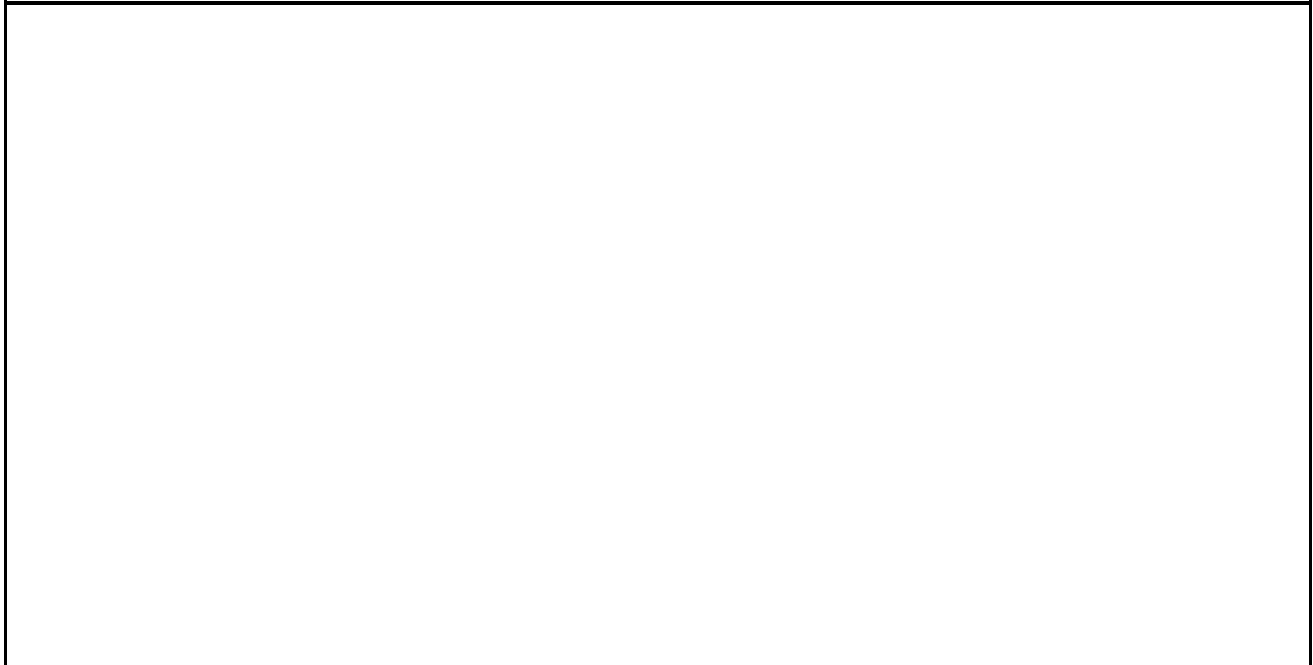
<sup>3</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>4</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA</b> <b>DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-002-0387	<b>Foglio</b> 1        di        25	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA**  
**NAVIGLIO DI PAVIA**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-387	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		2	di		25

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL CANALE NAVIGLIO DI PAVIA .....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>10</b>
5.1	Erosione al fondo	10
5.2	Definizione della profondità di posa	12
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>13</b>
6.1	Verifica del gradiente critico	14
6.2	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	15
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>17</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>18</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_o</math> E <math>\beta C</math> .....</b>	<b>25</b>



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-387	Rev.: 00						N°Doc. Cliente: -
		Foglio	3	di	25		

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Naviglio di Pavia, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del canale che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno pur cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale e di ripristino, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica della TOC. Le postazioni di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 100 m dall'alveo inciso del fiume; la profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge poco più di 11 m. terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le postazioni di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui, ad opera finita, l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il canale e con i relativi deflussi.

L'attraversamento del Naviglio di Pavia è ubicato in una zona distinta in dettaglio al F. 9 del NCT del Comune di Rognano (PV) ed al Foglio 4 del NCT del Comune di Giussago (PV).

Scopo e finalità del presente studio è verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-387	Foglio 4 di 25					-	

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-387	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
	Foglio 5 di 25					

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Naviglio di Pavia è un canale artificiale che ha origine come derivazione del Naviglio Grande in corrispondenza della Darsena di Milano, con una portata di circa 10 mc/s, è lungo 33 km e sfocia in Ticino presso Pavia. Il dislivello tra la darsena di porta Ticinese e il Ticino è di 56,6 metri, dei quali 4,40 sono superati dall'inclinazione del fondo, mentre agli altri 52,2 provvedono dodici conche con cascate.

Alimenta una rete derivata di estensione superiore a 250 Km con 10 mila ettari di superficie irrigata.

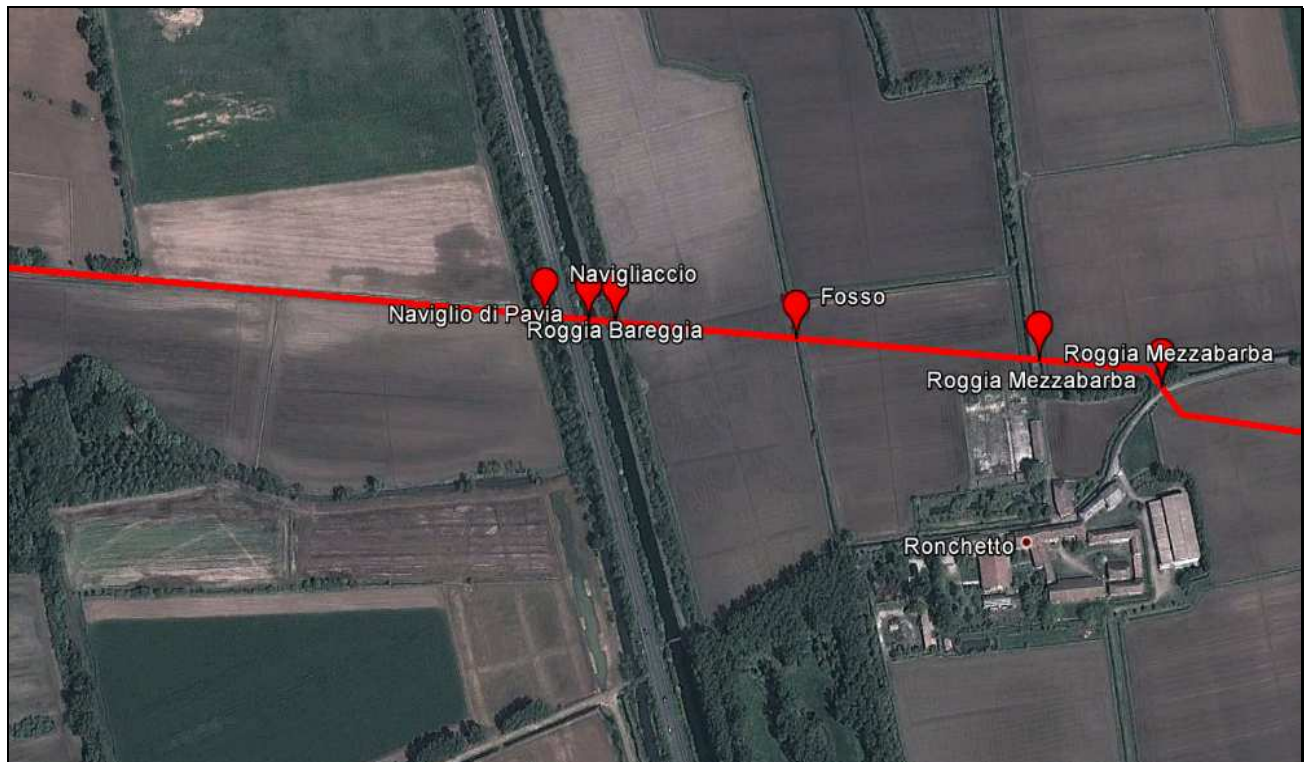


Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (da Google Earth 2012)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-387	Rev.:	00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio		6	di	25	

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa il Naviglio di Pavia è un'opera artificiale che riceve le acque da un canale anch'esso artificiale.

Non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si procederà alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori determinerebbero il superamento delle arginature, con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 24,0 \text{ mc/sec}$$

Oltre a tale valore di portata verrà considerato anche quello corrispondente alla portata media derivata dal canale che, alla sezione di presa, risulta:

$$Q_{\text{med}} = 12,6 \text{ mc/sec}$$

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-387	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	7	di	25	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL CANALE NAVIGLIO DI PAVIA

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 100 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-387	Foglio 8 di 25			-		

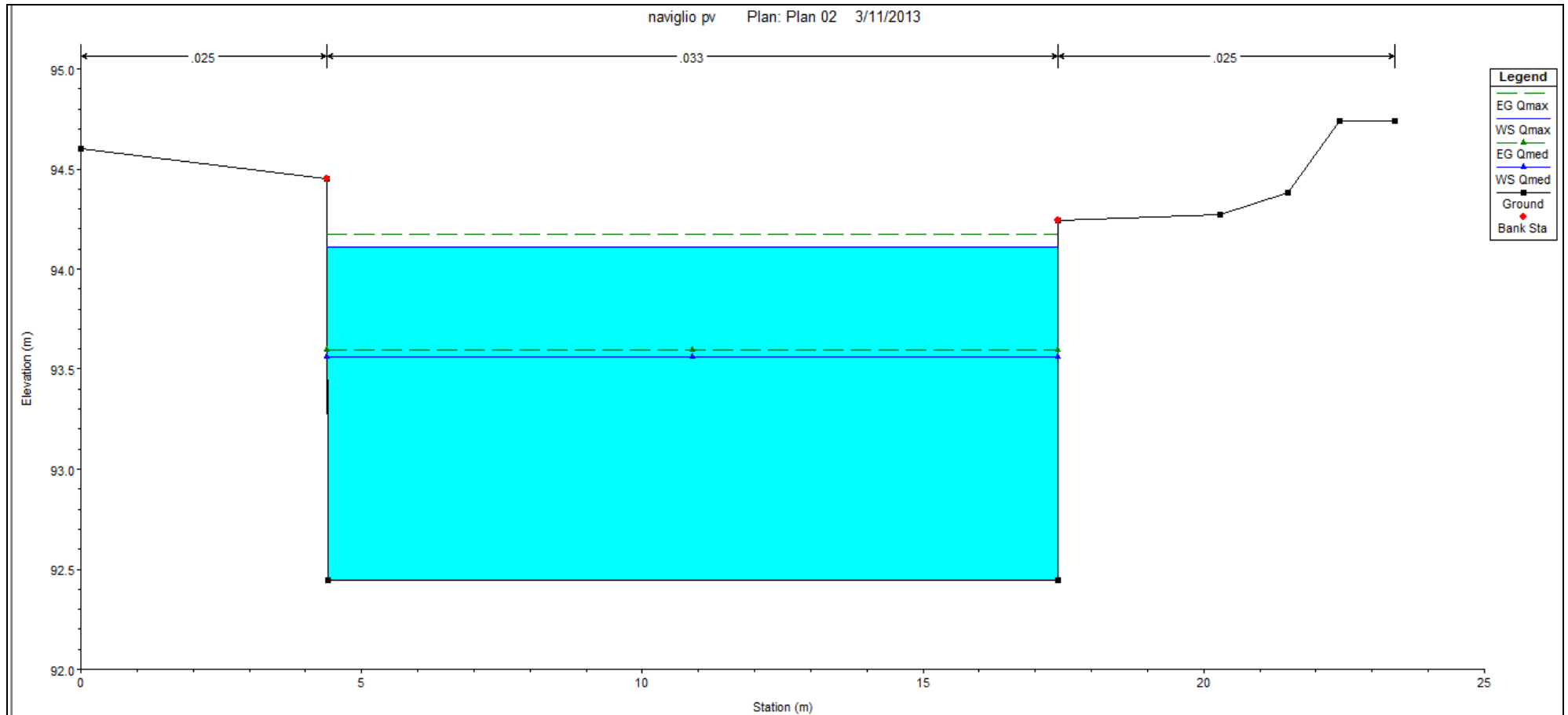


Figura 2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>									
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO DI PAVIA</b>									
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-002-387		Foglio 9 di 25			-				

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	24	92.45	94.15		94.21	0.000739	1.08	22.17	13.02	0.26	1.35	10.93
	12.6	92.45	93.6		93.64	0.000715	0.84	14.98	13.01	0.25	0.98	7.42
20	24	92.44	94.11		94.17	0.00092	1.11	21.64	13.02	0.27	1.33	11.96
	12.6	92.44	93.56		93.6	0.000883	0.87	14.48	13.01	0.26	0.95	8.23
10	24	92.44	94.06	93.14	94.12	0.001001	1.14	21.06	13.02	0.29	1.3	12.72
	12.6	92.44	93.51	92.9	93.55	0.001001	0.91	13.91	13.01	0.28	0.92	9.02

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 10 di 25					

## **5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE**

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata massima sopra calcolata (a piene rive).

### **5.1 Erosione al fondo**

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare alla presenza del rivestimento di fondo e sponde esistente nel tratto interessato dalle opere che potrebbe innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle ovvero alla presenza di tratti di rivestimento ammalorato che potrebbe dar luogo all'innescamento di fenomeni erosivi nel punto in cui lo stesso risultasse danneggiato.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00						N°Doc. Cliente:
		Foglio 11 di 25					

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 0,62 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 0,62 * 1,50 = 0,92 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0387	Foglio		12	di	25	

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	13,00
<b>Y</b>	1,67
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	4,13
<b>βc</b>	11,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a circa 0,92 m**, poiché il progetto prevede di posare il tubo con la generatrice superiore ad **una profondità di m. 11,85** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00						N°Doc. Cliente:
		Foglio 13 di 25					

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è funzione a sua volta del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici, o a modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		14	di		25

Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica del percorso di filtrazione equivalente

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>3</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 4)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>4</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Poiché in questo tratto il Naviglio di Pavia scorre parzialmente incassato rispetto al piano campagna, a titolo cautelativo la verifica viene condotta rispetto al fondo dell'adiacente Roggia Bareggia, nell'ipotesi che questa sia vuota mentre il Naviglio sia al massimo livello di riempimento.

<sup>3</sup> Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un'ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

<sup>4</sup> Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all'80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	25	

In tal modo si viene ad avere una differenza di livello di 2,40 m.

$\Delta h$ [m]	2,40
L [m]	33,80
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
Fs	1,5 <sup>5</sup>
$i_{cr} / i$	5,60

Tabella 4: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr}/i \gg Fs$  la verifica è ampiamente soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura (L) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_1 \geq 0,10 \times L$$

---

5 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni di perforazione, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0387	Foglio 16 di 25					

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a  $45^\circ$ ) vengono inserite nel conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

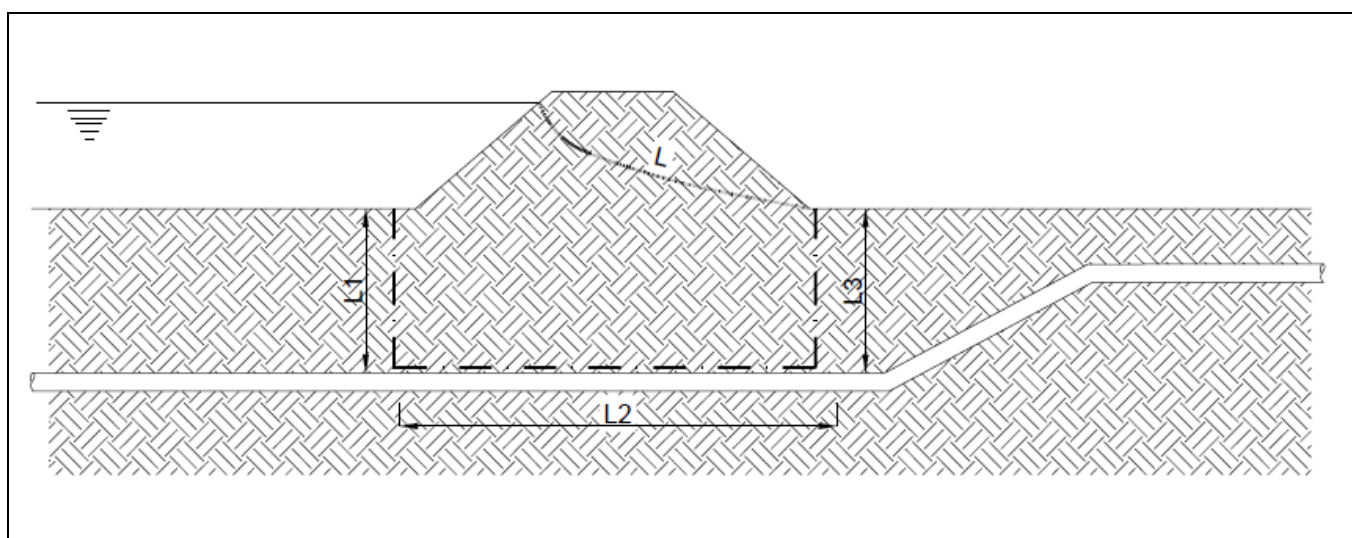


Figura 4: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

In tal modo si viene ad avere una differenza di livello di 2,40 m.

Risulta quindi:

L1 [m]	11,85
L2 [m]	10,50
L3 [m]	11,45
L [m]	10,65
0,1xL	1,06
$L_t > 1,2L$	Ok

Tabella 5: verifica del percorso equivalente

Essendo sempre  $L1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$  la verifica è ampiamente soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0387	Foglio 17 di 25						

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo della Naviglio di Pavia che, si ricorda, verrà eseguito con la tecnica della TOC, ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 11,85.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente anni con un coefficiente di sicurezza ampiamente superiore a 1,50;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento dell'opera sia a breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		18	di		25

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS<sup>®</sup> ed è stato sviluppato dall'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00						N° Doc. Cliente:
		Foglio 19 di 25					

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;

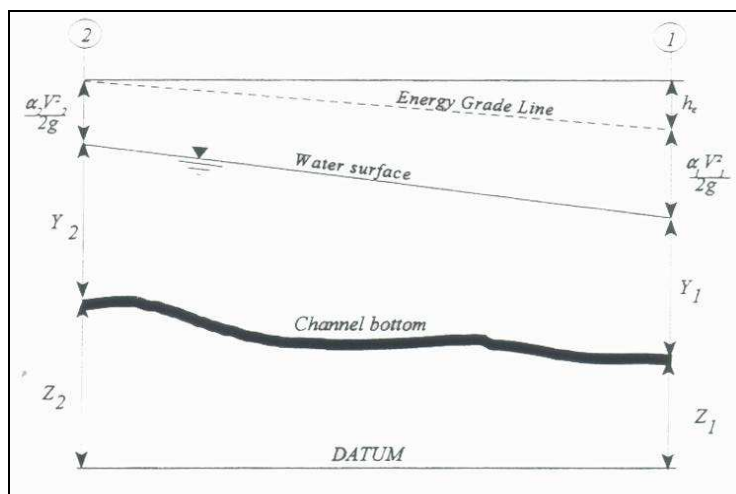
<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	20	di	25	

- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;
- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 4).



Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	21	di	25	

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

g : accelerazione gravitazionale;

$h_e$  : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

$L_{lob}, L_{ch}, L_{rob}$ : sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il canale di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}, \overline{Q_{ch}}, \overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

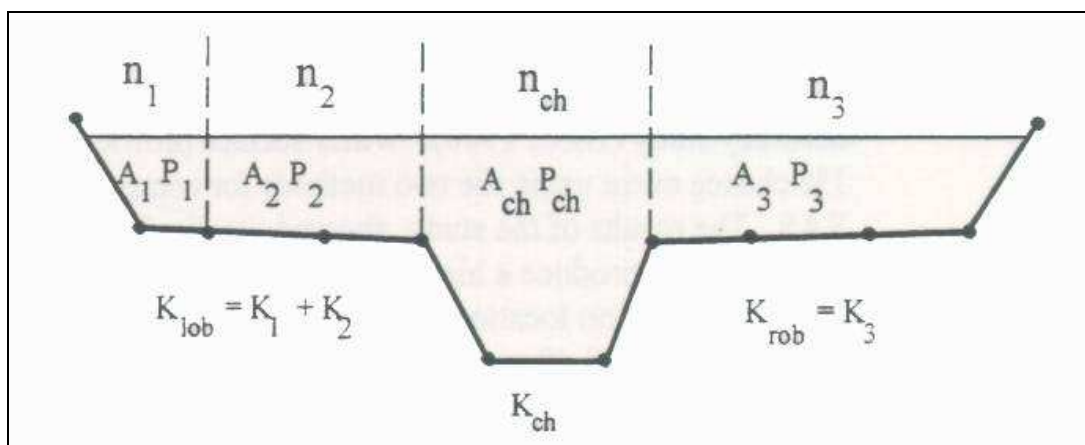
Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
	Foglio 22 di 25					

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa  $x = 0$ ) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).



Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	23	di	25	

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

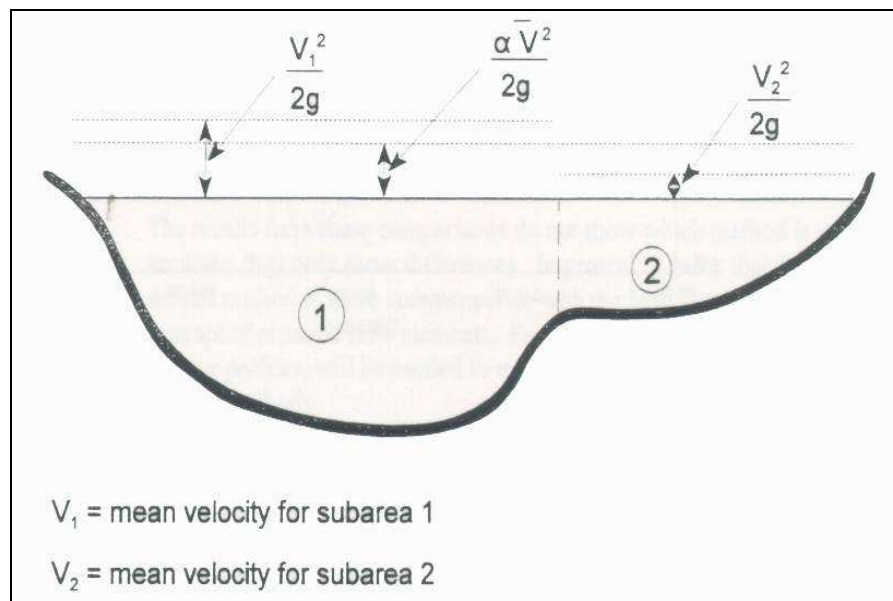
dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.



Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
		Foglio 24 di 25				

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove C rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI PAVIA						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0387	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 25 di 25					

## ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI $d_0$ E $\beta_c$

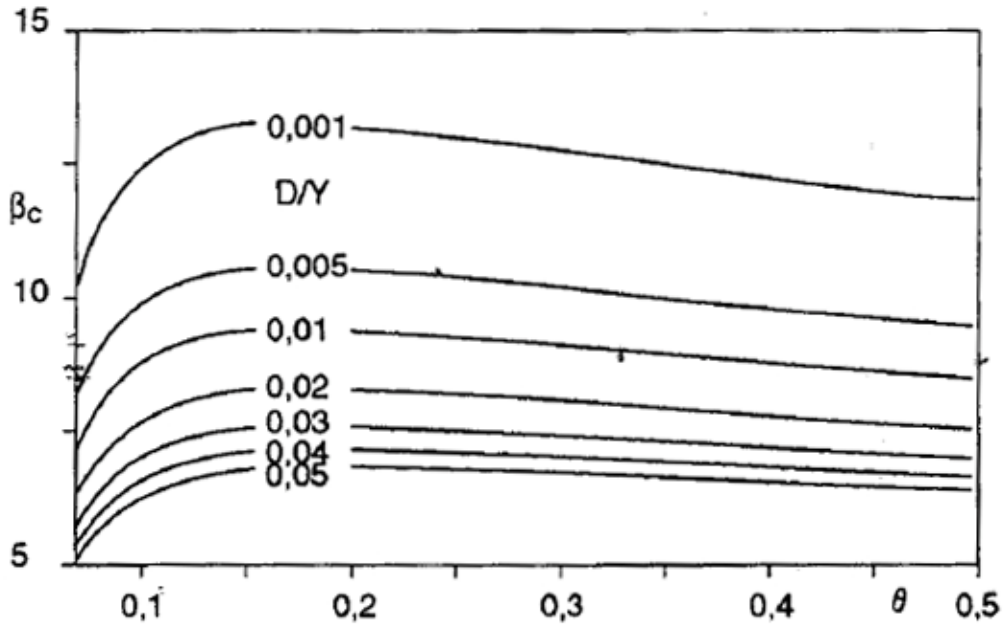


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^6$

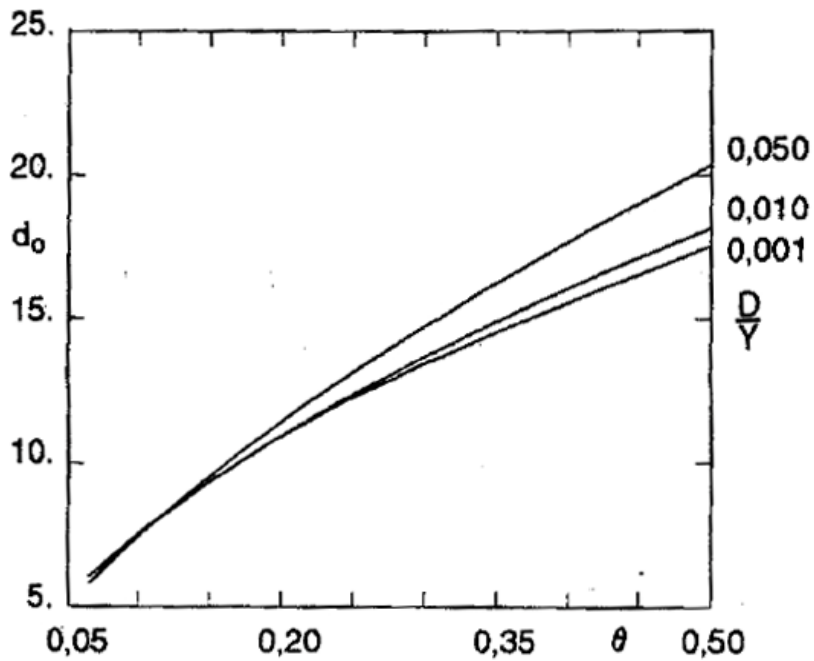


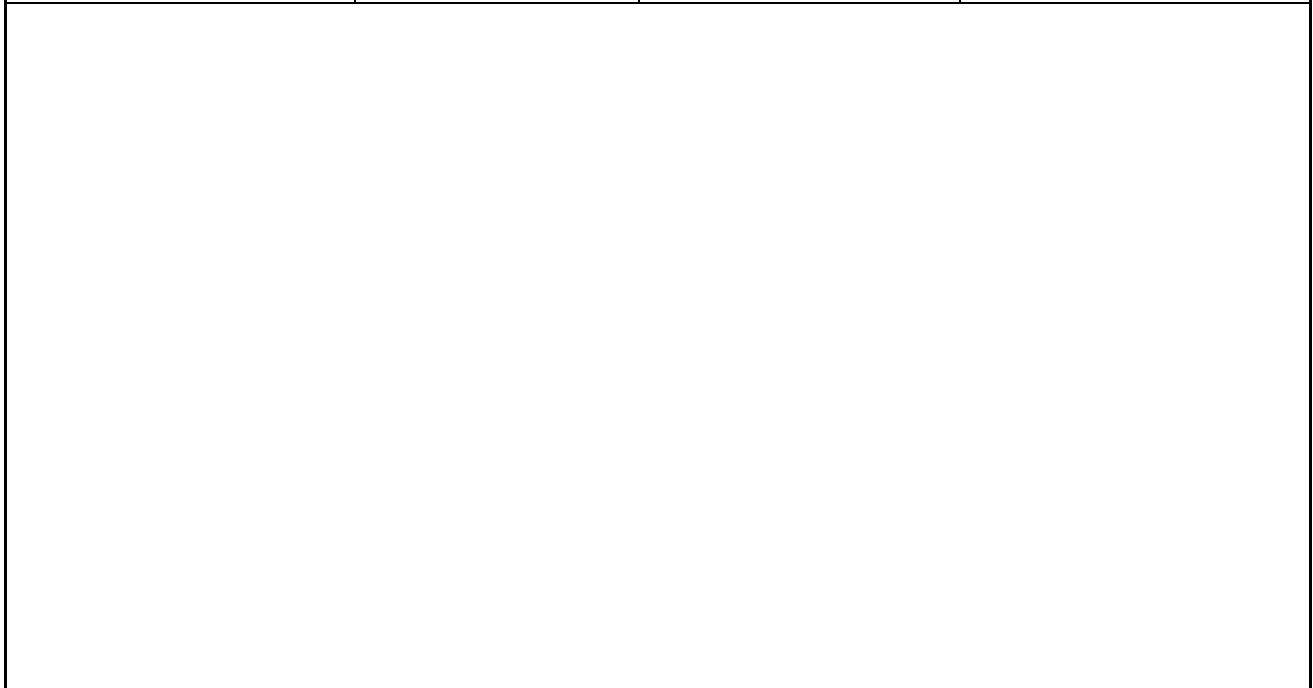


Tabella per la determinazione di  $d_0^7$

<sup>6</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-002-0487	<b>Foglio</b> 1            di            27	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
COLATORE NAVIGLIACCIO**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	2	di	27		

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL CANALE COLATORE NAVIGLIACCIO.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>12</b>
5.1	Erosione al fondo	12
5.2	Definizione della profondità di posa	14
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>15</b>
6.1	Verifica del gradiente critico	16
6.2	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	17
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>19</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>20</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>d_o</math> E <math>\beta_c</math></b>	<b>26</b>
	<b>ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>1</sup></b>	<b>27</b>

---

<sup>1</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuuld, Olanda, 1985

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		3	di		27

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Colatore Navigliaccio, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del canale che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno, pur cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale per garantire il transito delle portate necessarie, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con microtunnel di diametro interno 2400 mm. Le buche di spinta e di arrivo sono distanti oltre 100 m dagli argini del canale, con una profondità di posa che, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge poco più di 11 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il microtunnel DN 2400 verrà intasata con malta bentonitica o cementizia. terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui, ad opera finita, l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il canale e il relativo deflusso.

L'attraversamento del Canale è ubicato in una zona distinta in dettaglio al F. 9 del NCT del Comune di Rognano (PV) ed al F. 4 del NCT del Comune di Giussago (PV). Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione adottata e illustrata nei paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo, quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0487	Foglio 4 di 27						

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	5	di	27	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Colatore Navigliaccio o Roggia Ticinello Occidentale è un canale artificiale on funzione principalmente irrigua che nasce in Comune di Calvignasco e termina nel Ticino in Comune di Binasco. Lungo il percorso è interconnesso a varie rogge in cui versa o da cui riceve quote d'acqua quali la Roggia Mischia, la Roggia Bergonza, Roggia Gamberina.

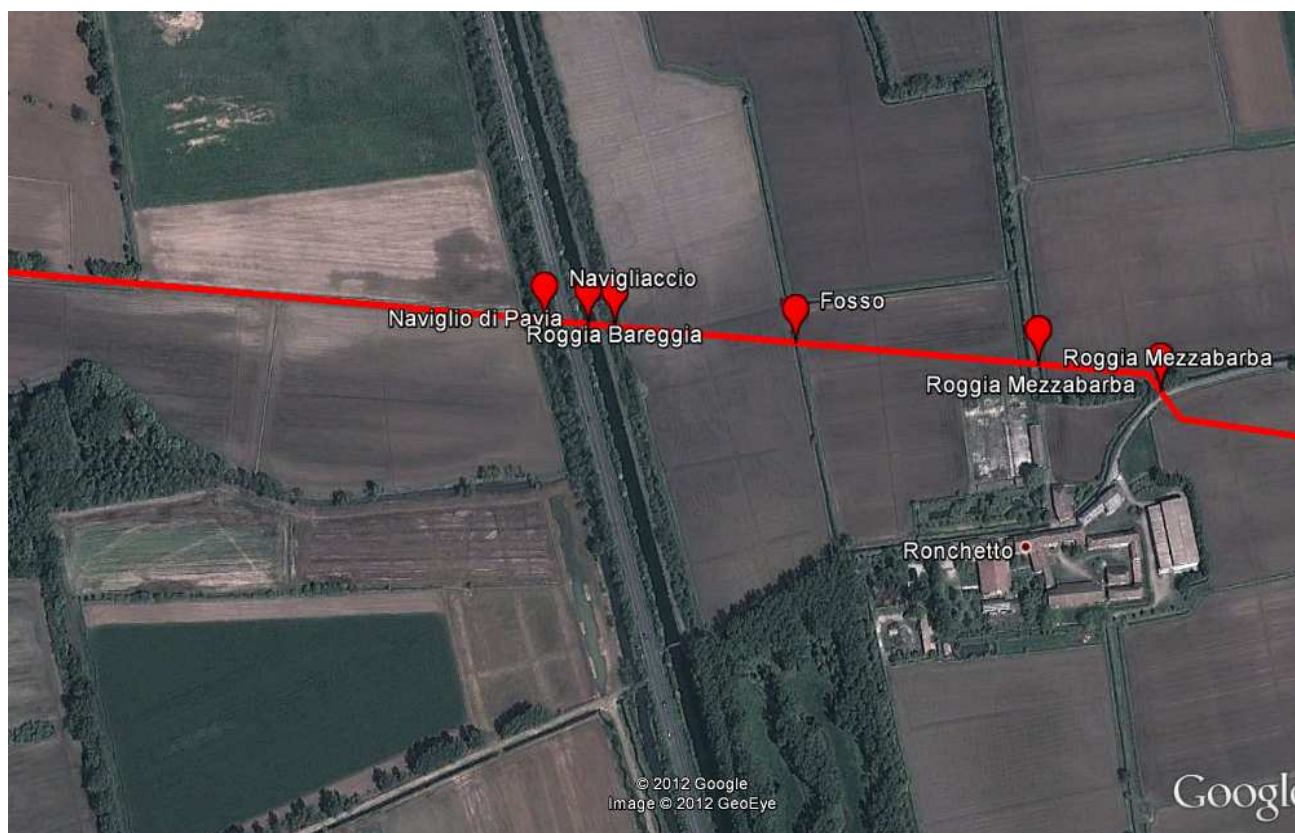


Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		6	di		27

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa, il Colatore Navigliaccio è un opera artificiale, non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto, partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si è proceduto alla determinazione del valore di portata con un metodo di tipo speditivo, ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo, in quanto portate superiori determinerebbero il superamento delle arginature, con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni, pertanto, ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente, nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente. Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 40,0 \text{ mc/sec}$$

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	7	di	27	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL CANALE COLATORE NAVIGLIACCIO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 100 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella "Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po", che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 2 m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tabella 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 8 di 27					

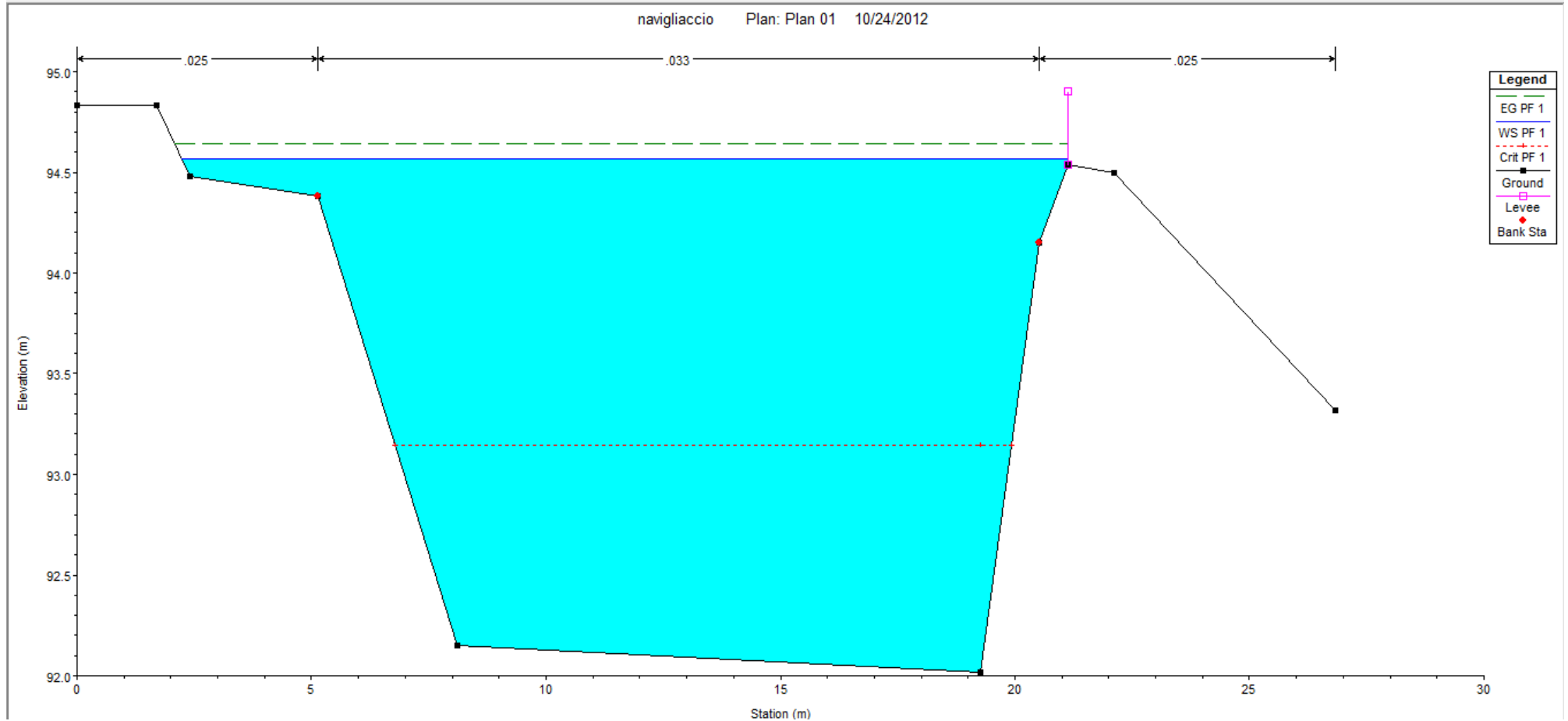


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0487	Foglio		9	di	27	

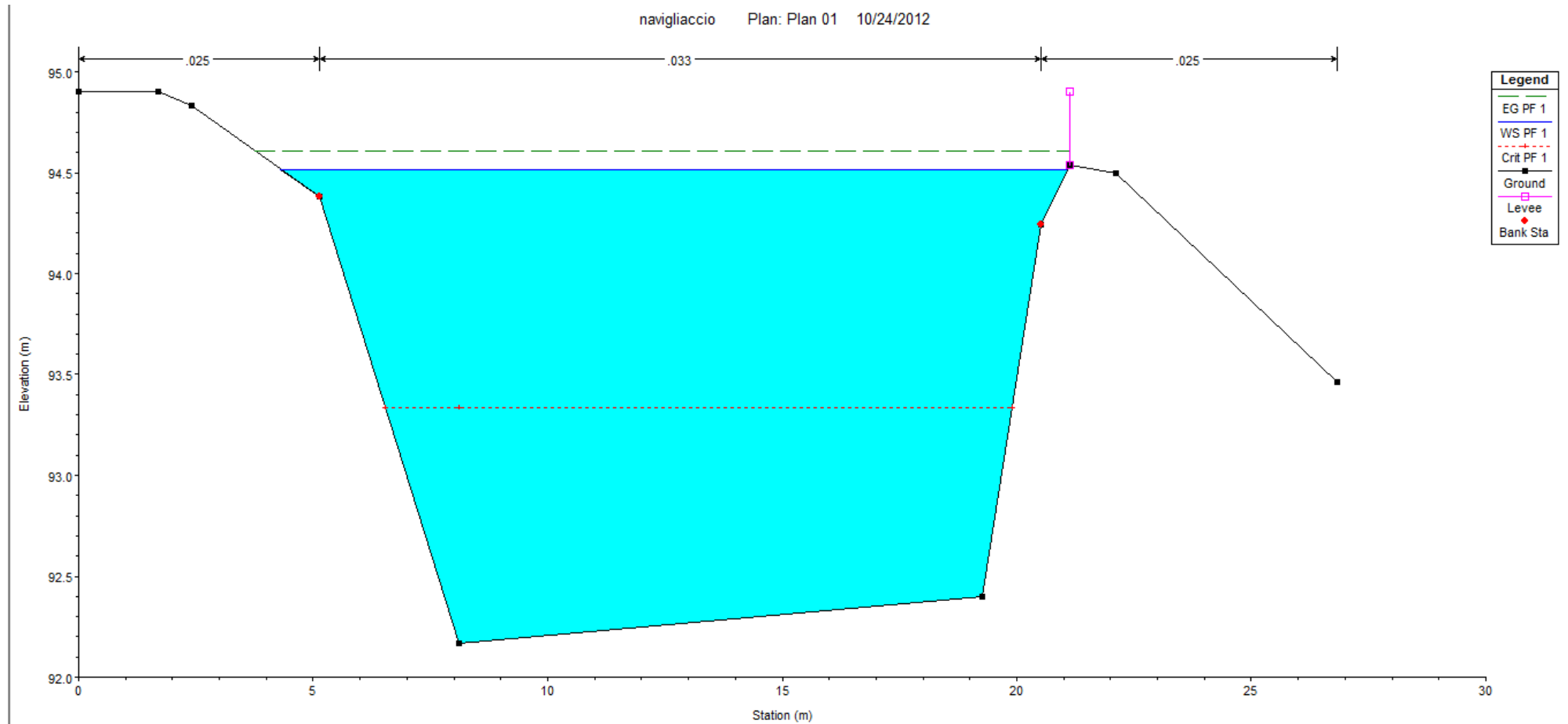


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo



METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0487	Foglio		10	di	27	

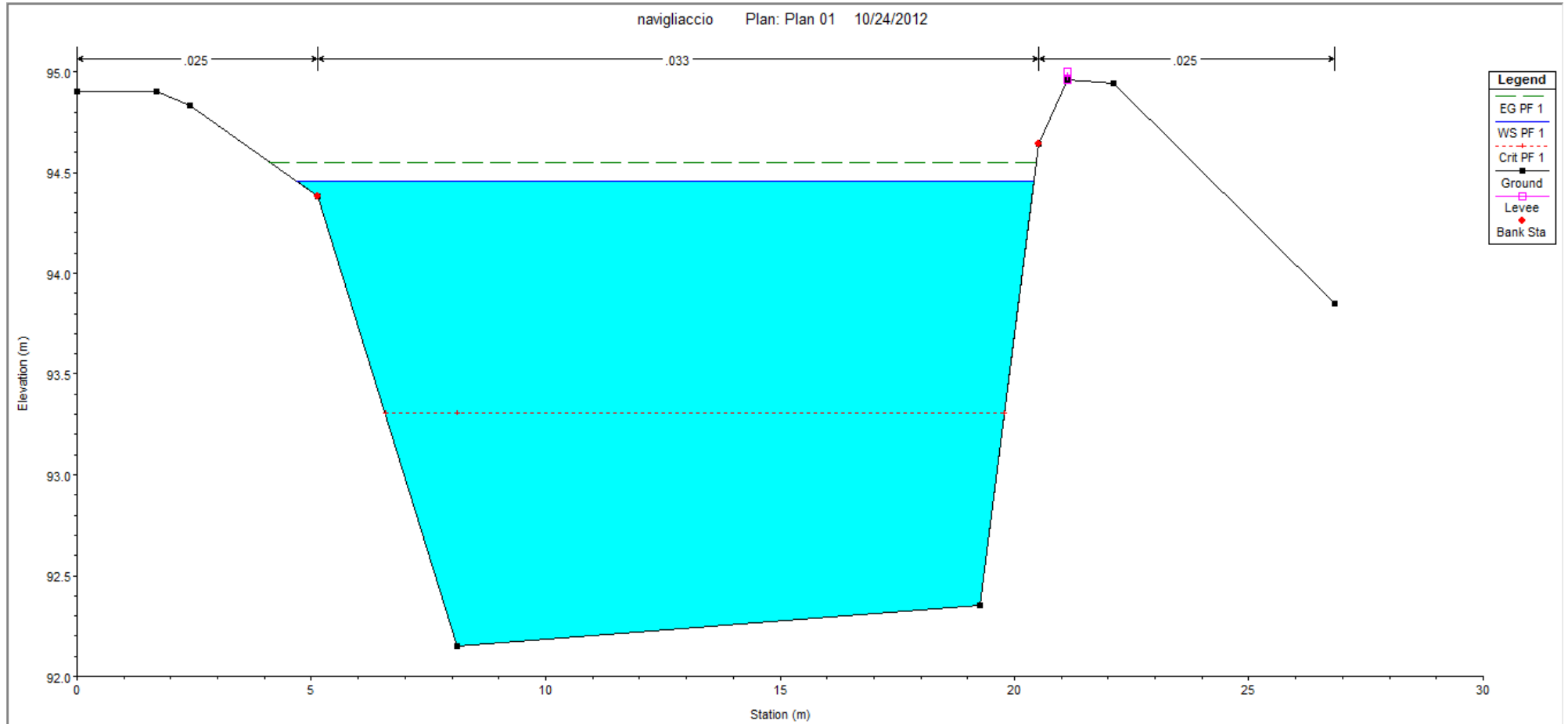


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>									
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>									
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487		Rev.: 00						N°Doc. Cliente:	
		Foglio 11 di 27							

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	40	92.02	94.57	93.15	94.64	0.000647	1.19	33.91	18.89	0.26	1.61	12.22
20	40	92.17	94.52	93.34	94.61	0.000904	1.33	30.21	16.77	0.3	1.63	15.61
10	40	92.15	94.45	93.31	94.55	0.001001	1.36	29.33	15.73	0.31	1.66	16.67

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 12 di 27				

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame, la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	13	di	27	

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>2</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica  $q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 0,88 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che le formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50, risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 0,88 * 1,50 = 1,32 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>3</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	14	di	27	

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	11,14
<b>Y</b>	2,35
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	2,38
<b>βc</b>	11,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta > \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene pertanto che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta a possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a circa 1,35 m**, poiché il progetto prevede di posare il tubo con la generatrice superiore ad **una profondità di m. 11,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 15 di 27					

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) quanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici o modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo, ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica (il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere). Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		16	di	27	

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica dei percorsi di filtrazione equivalenti

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>4</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

Poichè in questo tratto il canale scorre parzialmente incassato rispetto al piano campagna, a titolo cautelativo, la verifica viene condotta rispetto al fondo dell'adiacente Naviglio Pavese nell'ipotesi che il Canale Colatore Navigliaccio sia pieno al massimo livello mentre il naviglio sia vuoto.

Risulta in tal modo una differenza di livello  $\Delta h_{max} = 0,83$  m

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 3)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>5</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Nel caso in esame si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

4 Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

5 Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all' 80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 17	di	27		

$\Delta h$ [m]	0,83
$L_{1-2-3}$ [m]	33,94
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	1,5 <sup>6</sup>
$i_{cr} / i$	16,35

Tabella 4: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_t \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a 45°) vengono inserite nel

---

6 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni di perforazione, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 18	di 27			

conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

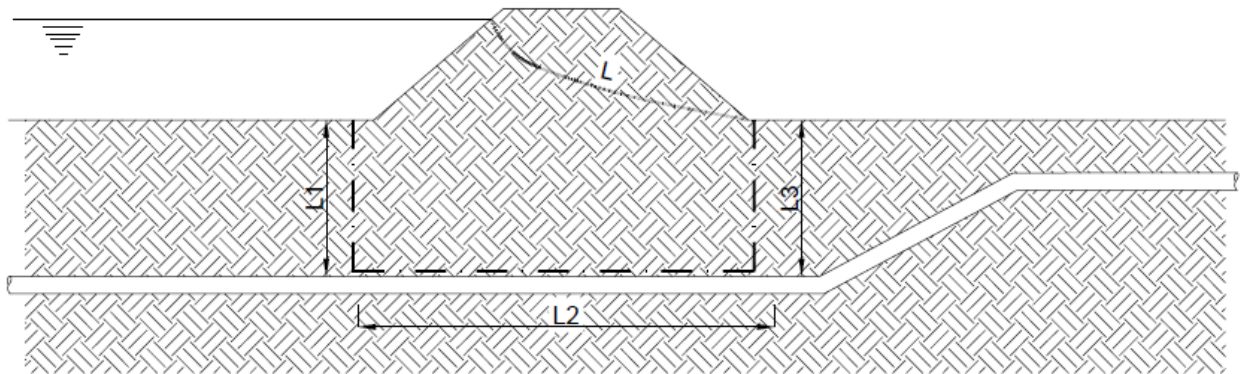


Figura 3: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

Assumendo le stesse ipotesi viste al punto precedente, il dislivello massimo risulta di 0,83 m.

Risulta quindi:

L1 [m]	11,30
L2 [m]	10,60
L3 [m]	11,45
L [m]	18,0
0,1xL	1,80
$L_t > 1,2xL$	Ok

Tabella 5: verifica del percorso equivalente

Poiché risulta sempre  $L1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$ , la verifica è sempre soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 19 di 27					

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo della Colatore Navigliaccio che, si ricorda, verrà eseguito con la tecnica microtunnelling, con foro avente diametro interno 2400 mm e una profondità di m. 11,30 rispetto al punto più depresso del fondo alveo.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente con un coefficiente di sicurezza ampiamente superiore a 1,50;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento dell'opera sia nel breve che nel lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	20	di	27	

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 21 di 27				

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 22	di 27			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

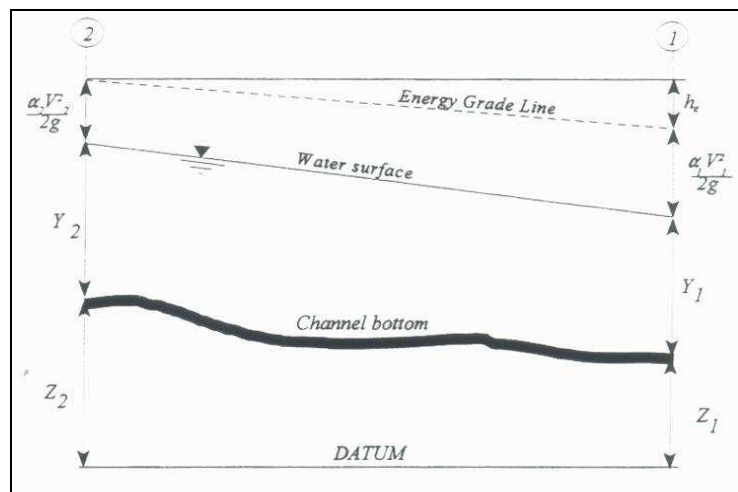


Fig.1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0487	Foglio		23	di	27	

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il canale di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 24	di	27		

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

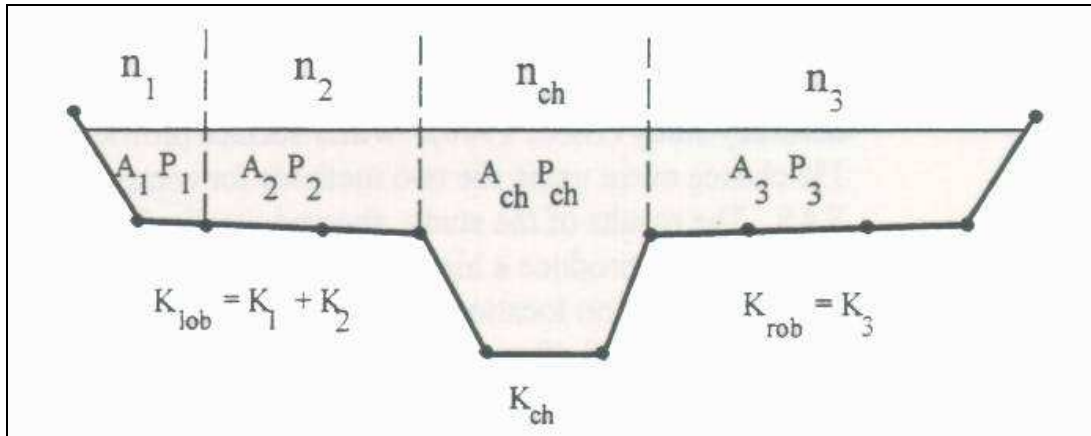


Fig. 2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
Foglio 25 di 27						

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

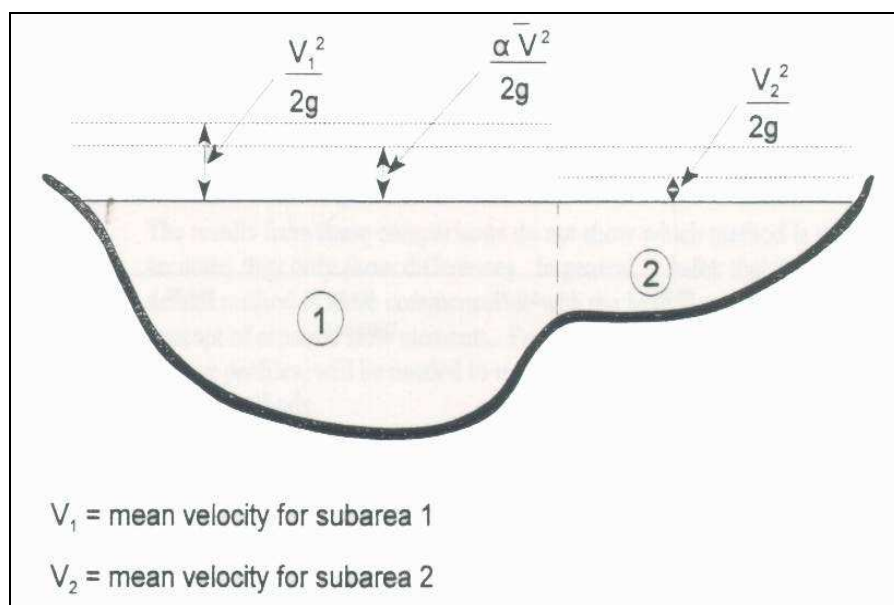


Fig. 3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione



METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-002-0487	Foglio 26 di 27					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

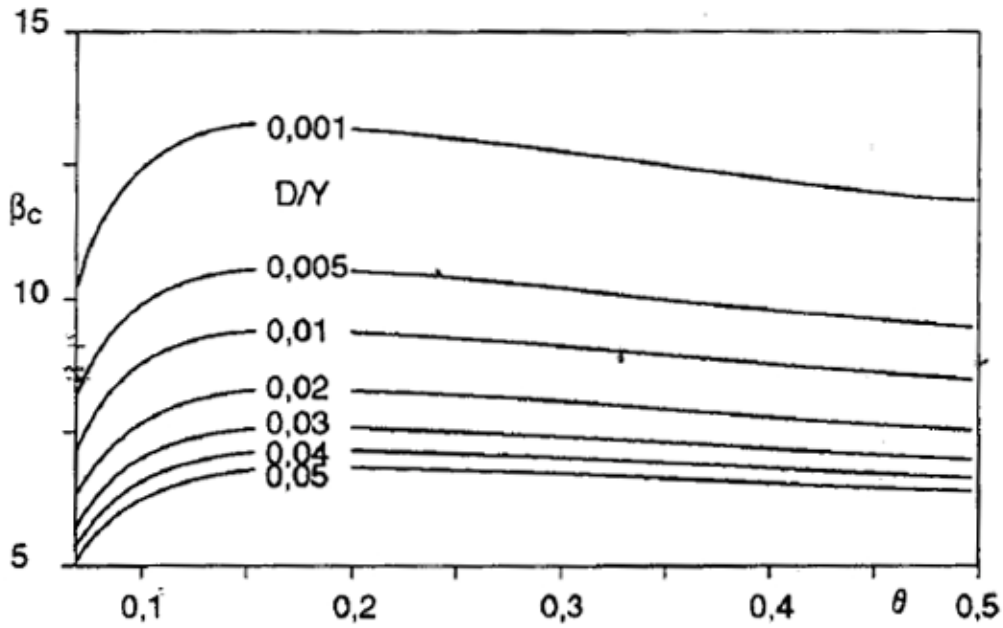


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^7$

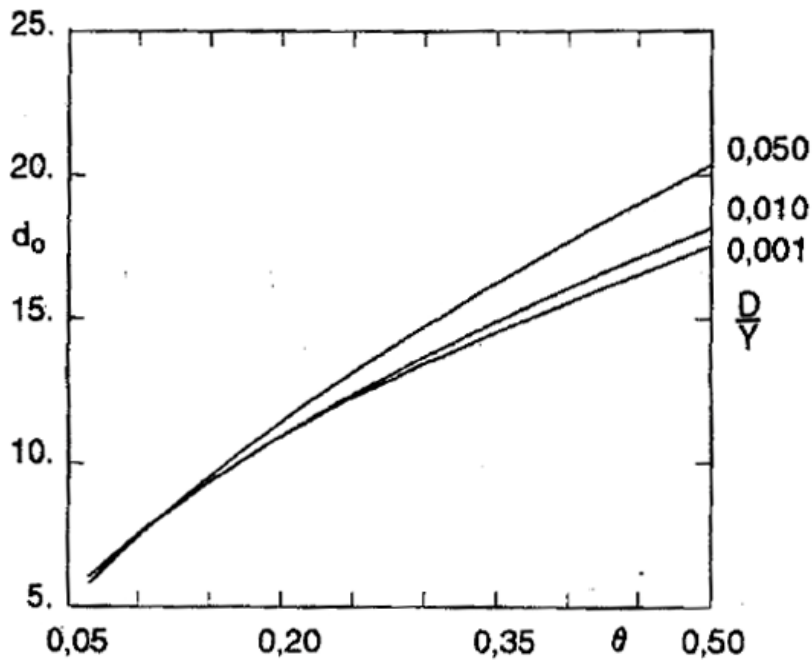


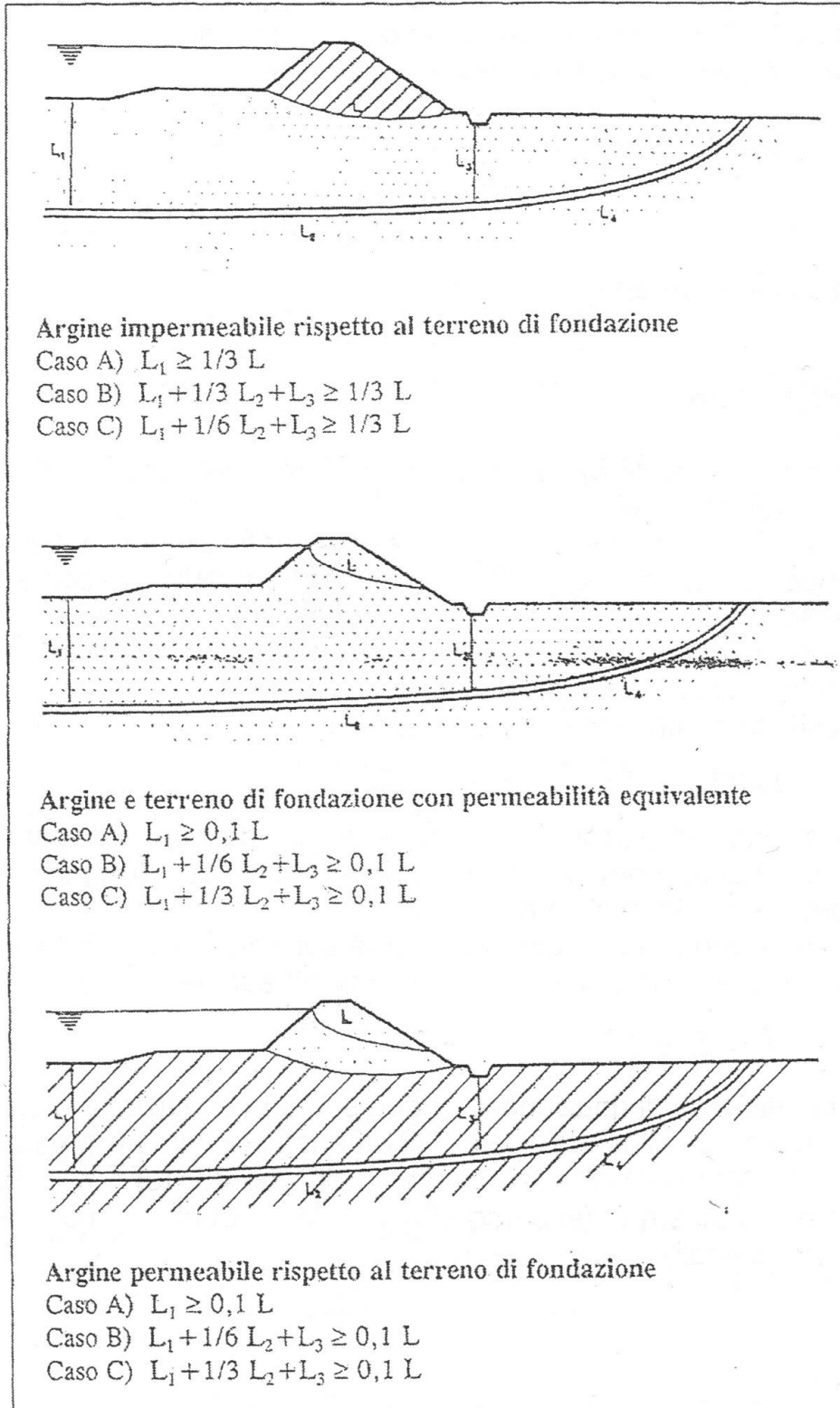
Tabella per la determinazione di  $d_0^8$

<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna



<sup>8</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA COLATORE NAVIGLIACCIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-002-0487	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 27 di 27				

### ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>9</sup>



<sup>9</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuild, Olanda, 1985

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Ciente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-003-0159	<b>Foglio</b> 1            di            23	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
NAVIGLIO DI BEREGUARDO**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>						
N° Do c. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-159	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio	2	di	23	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL NAVIGLIO BEREGUARDO.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>12</b>
<b>5.1</b>	<b>Erosione al fondo</b>	<b>12</b>
<b>5.2</b>	<b>Definizione della profondità di posa</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>16</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>17</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>d_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>23</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>							
N° Do c. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-159	Rev.: 00						N° Doc. Cliente: -
		Foglio 3 di 23					

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Naviglio Bereguardo, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") facente parte del 3° tronco della nuova linea DP 75 bar Cervignano-Mo rtara.

Per evitare di interferire con l'alveo del naviglio che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno, per cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza minima di circa 15 m dal ciglio di sponda superiore del Naviglio. La profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 2,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il tubo camicia verrà sigillata alle estremità con una guaina termorestringente mentre le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opere finite l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con l'alveo e le sue pertinenze

L'attraversamento del Naviglio Bereguardo è ubicato in una zona distinta in dettaglio al F. 07 del NCT del Comune di Casorate Primo (PV).

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>							
N° Do c. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Do c. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-159	Foglio 4 di 23					-	

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>						
N° Do c. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-159	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
	Foglio 5 di 23					

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Naviglio Bereguardo è una canale artificiale costruito verso la metà del 1400 per garantire il trasporto di merci fino al centro di Milano. Terminato l'utilizzo per i trasporti è divenuto un importante canale di irrigazione per questa parte di pianura lombarda.

Deriva le sue acque dal Naviglio Grande ad Abbiategrasso e termina nel Fiume Ticino a Bereguardo, con una lunghezza di complessivi 19 km, con un dislivello di complessivi 24 metri circa che veniva superato con 12 conche di navigazione che, ancora presenti, fungono da briglie di stabilizzazione del fondo alveo.

La portata derivata è di 11,5 mc/sec e garantisce l'irrigazione di un comprensorio di 7.000 ettari.



Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (da Google Earth 2012)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>							
N°Do c. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-159	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 6 di 23					

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa il Naviglio Bereguardo è un'opera artificiale che riceve le acque da un canale anch'esso artificiale.

Non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa, non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si è proceduto alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori determinerebbero il superamento delle arginature, con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente, nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 70,0 \text{ mc/sec}$$

Oltre a tale valore di portata verrà considerato anche quello corrispondente alla portata media derivata dal canale che, alla sezione di presa, risulta:

$$Q_{\text{med}} = 14 \text{ mc/sec}$$



METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO						
N° Do c. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-159	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio	7	di	23	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL NAVIGLIO BEREGUARDO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 120 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>						
N°Do c. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-159	Foglio 8 di 23			-		

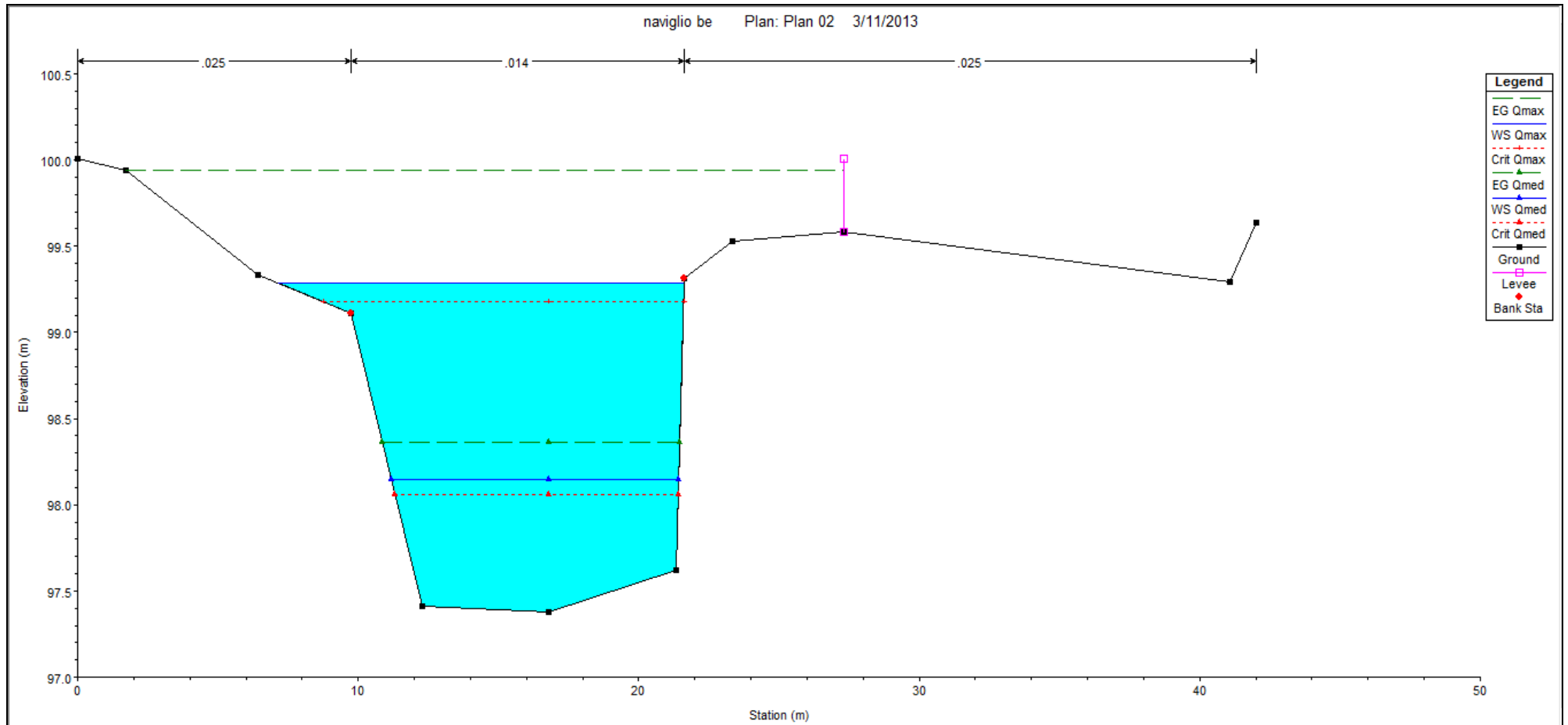


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>						
N°Do c. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-159	Foglio 9 di 23			-		

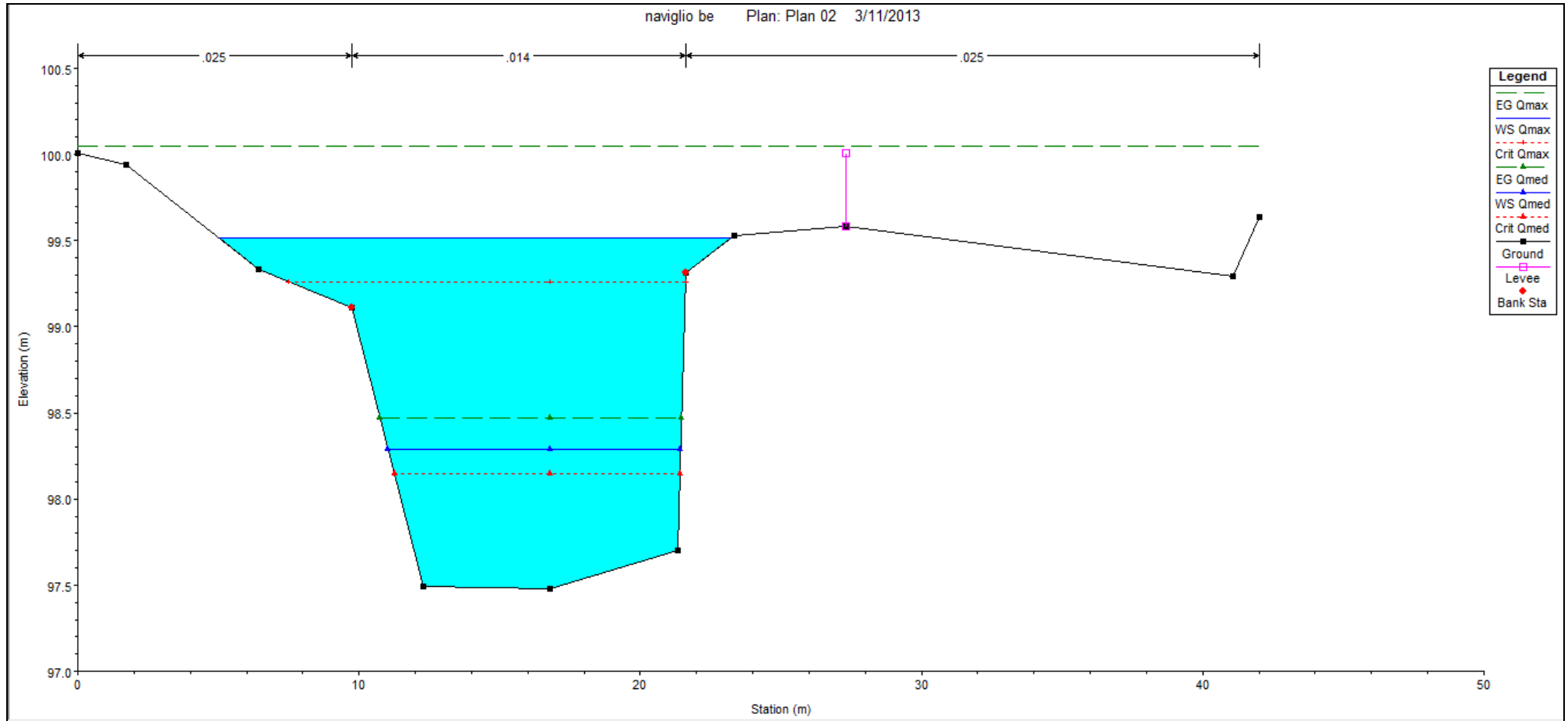


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>						
N°Do c. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-159	Foglio 10 di 23			-		

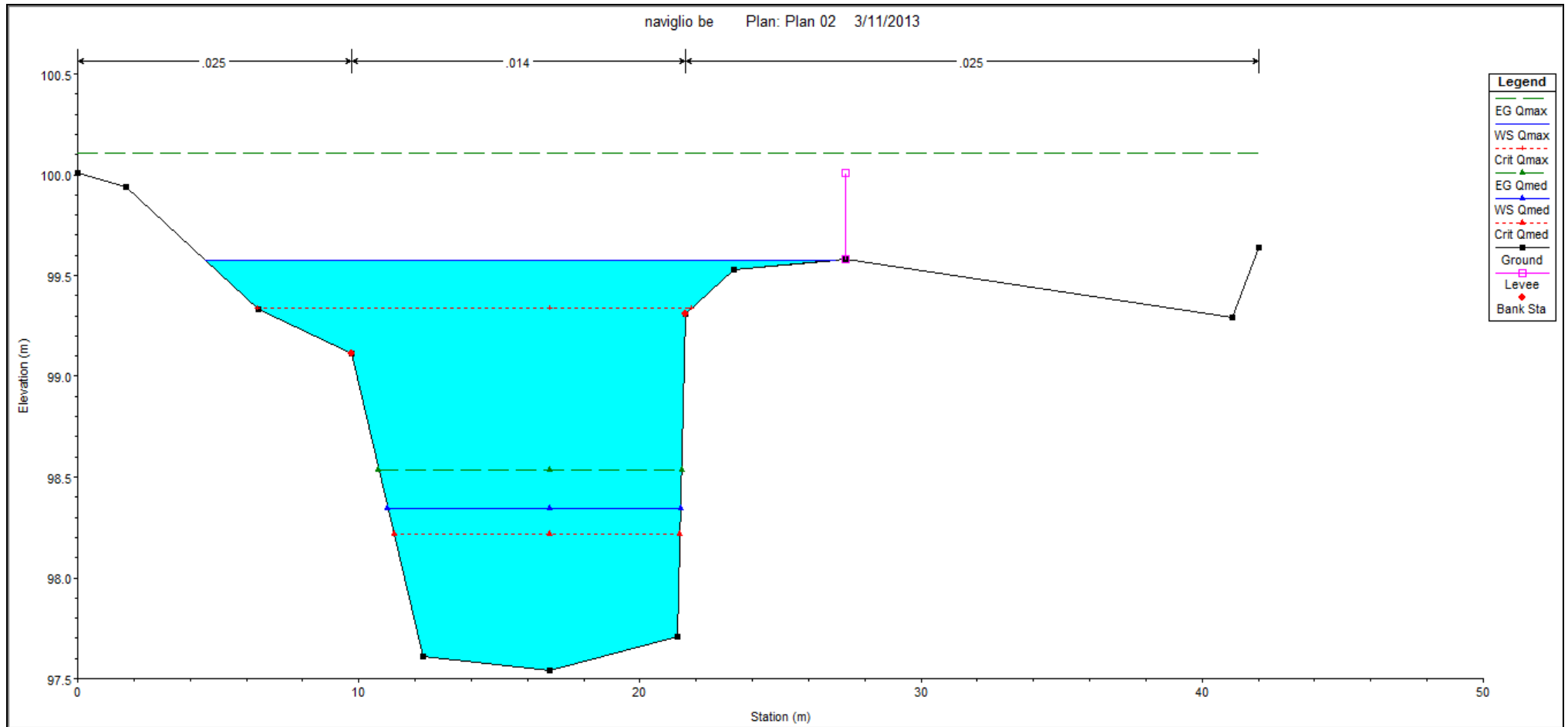


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MPRTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>									
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO BEREGUARDO</b>									
N°Do c. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-003-159		Foglio 11 di 23			-				

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	70	97.54	99.58	99.34	100.11	0.001138	3.25	23.06	22.47	0.77	0.95	17.45
30	14	97.54	98.35	98.21	98.54	0.001295	1.93	7.25	10.42	0.74	0.65	8.26
20	70	97.48	99.51	99.26	100.05	0.00116	3.26	22.53	18.18	0.78	1.13	17.66
20	14	97.48	98.29	98.14	98.47	0.001261	1.92	7.31	10.41	0.73	0.66	8.12
10	70	97.38	99.28	99.17	99.94	0.001601	3.59	19.68	14.49	0.9	1.2	22.14
10	14	97.38	98.15	98.06	98.37	0.001603	2.08	6.75	10.24	0.82	0.62	9.72

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 12 di 23				

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata massima sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 13 di 23					

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 1,15 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che le formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 1,15 * 1,50 = 1,72 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-0159	Foglio 14 di 23					

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b_{\max}} = 0,18 * Y * \left( \frac{D}{Y} \right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b_{\max}}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	9,30
<b>Y</b>	2,03
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	2,29
<b>βc</b>	11,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a 1,73 m**; poiché il progetto prevede di posare il tubo camicia con la generatrice superiore **ad una profondità di m. 2,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	23	

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è funzione a sua volta del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo parzialmente o totalmente inciso.

Nel caso in esame, il canale scorre incassato rispetto al piano campagna, per cui a regime, anche ipotizzando un livello idrico pari al massimo riempimento della sezione, non ci sarà alcuna differenza di carico idraulico che possa innescare detto fenomeno. La verifica del presente paragrafo risulta quindi superflua.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 16 di 23				

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Naviglio Bereguardo che, si ricorda, verrà eseguito la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene, con la generatrice superiore ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 2,00.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente con un coefficiente di sicurezza di poco superiore a 1,50;
- che la geometria del corso d'acqua nella zona dell'attraversamento, caratterizzata da un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, consente di escludere qualsiasi rischio di sifonamento sia nel breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
Foglio 17 di 23						

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-0159	Foglio 18 di 23					

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al naviglio principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e naviglio principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 19	di 23			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

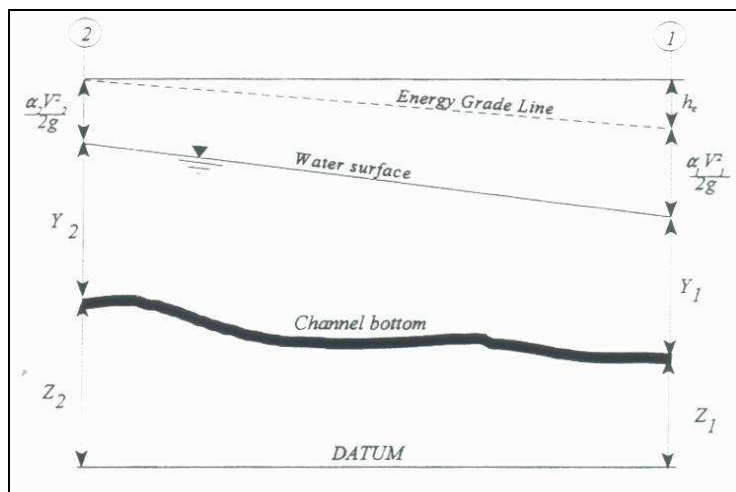


Fig. 1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 20	di	23		

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il naviglio di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 21	di	23		

Nel naviglio principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

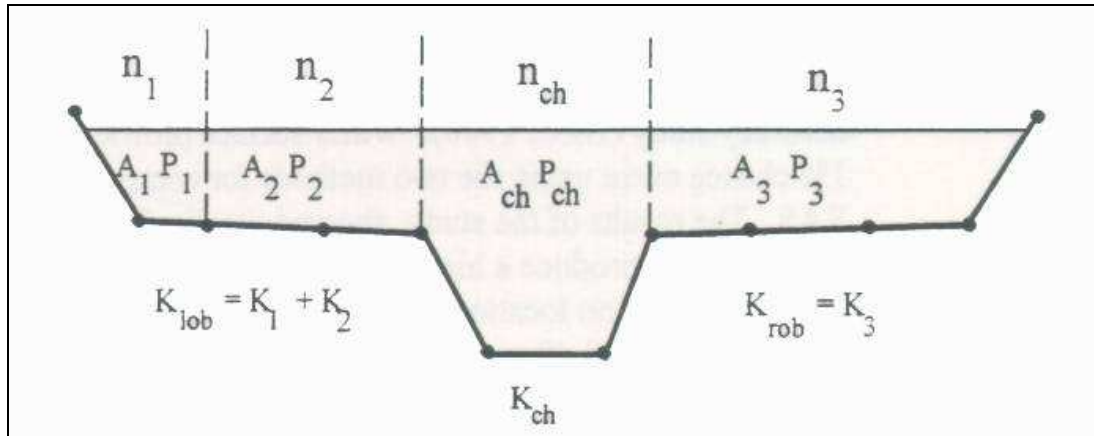


Fig.2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-003-0159	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 22	di	23		

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, naviglio principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, naviglio principale e golena destra.

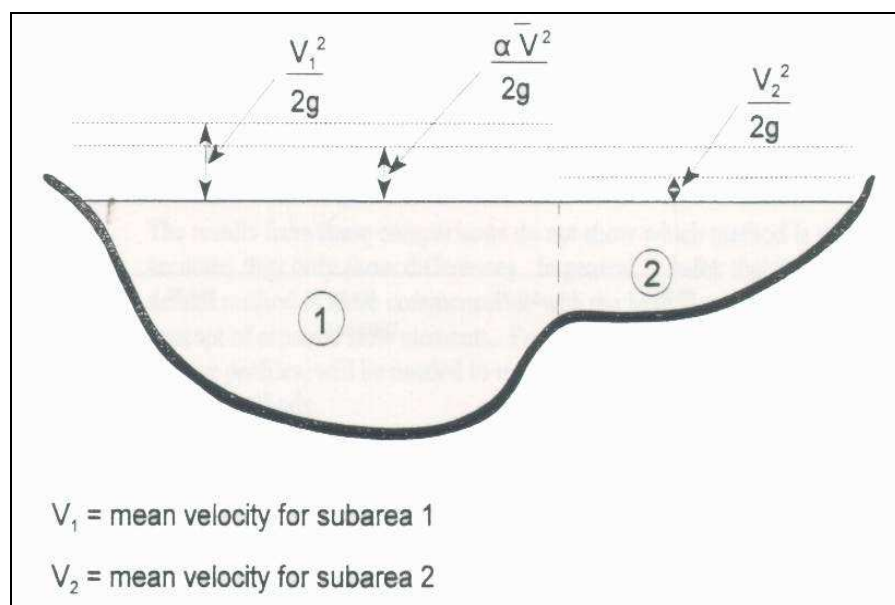


Fig.3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione



METANODOTTO CERVIGNANO-BEREGUARDO DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO DI BEREGUARDO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-003-0159	Foglio		23	di	23	

## ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI $d_0$ E $\beta_c$

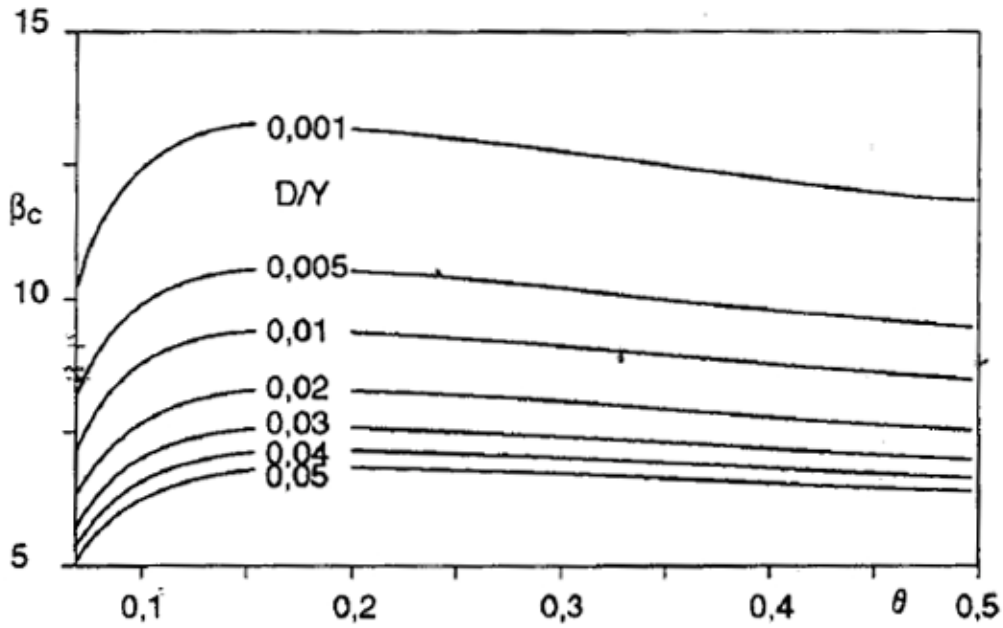


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^3$

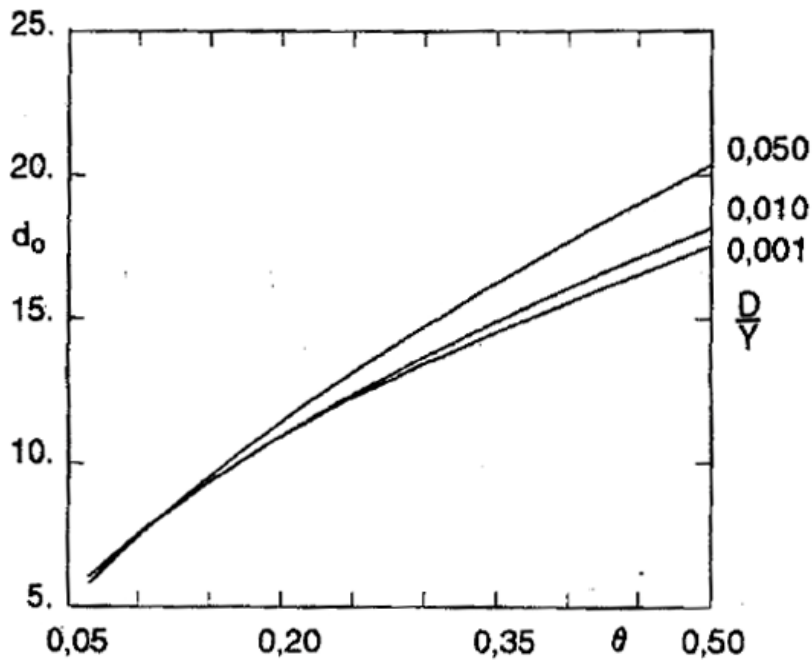


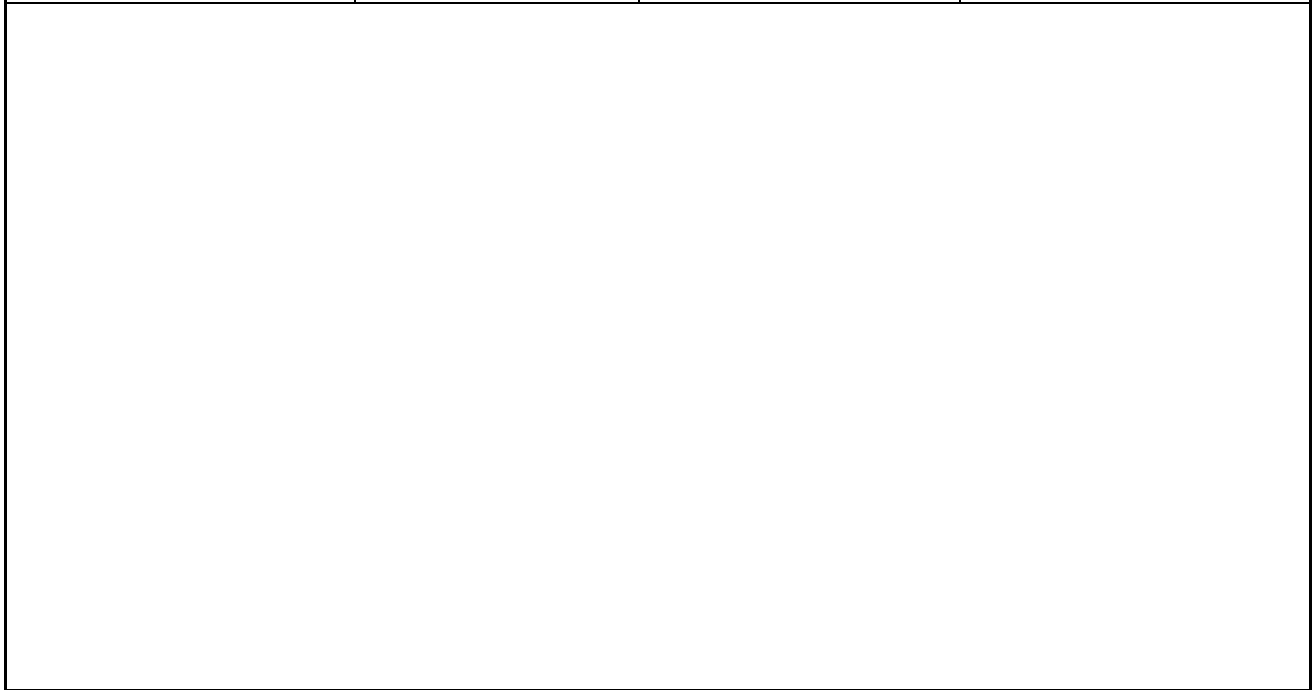


Tabella per la determinazione di  $d_0^4$

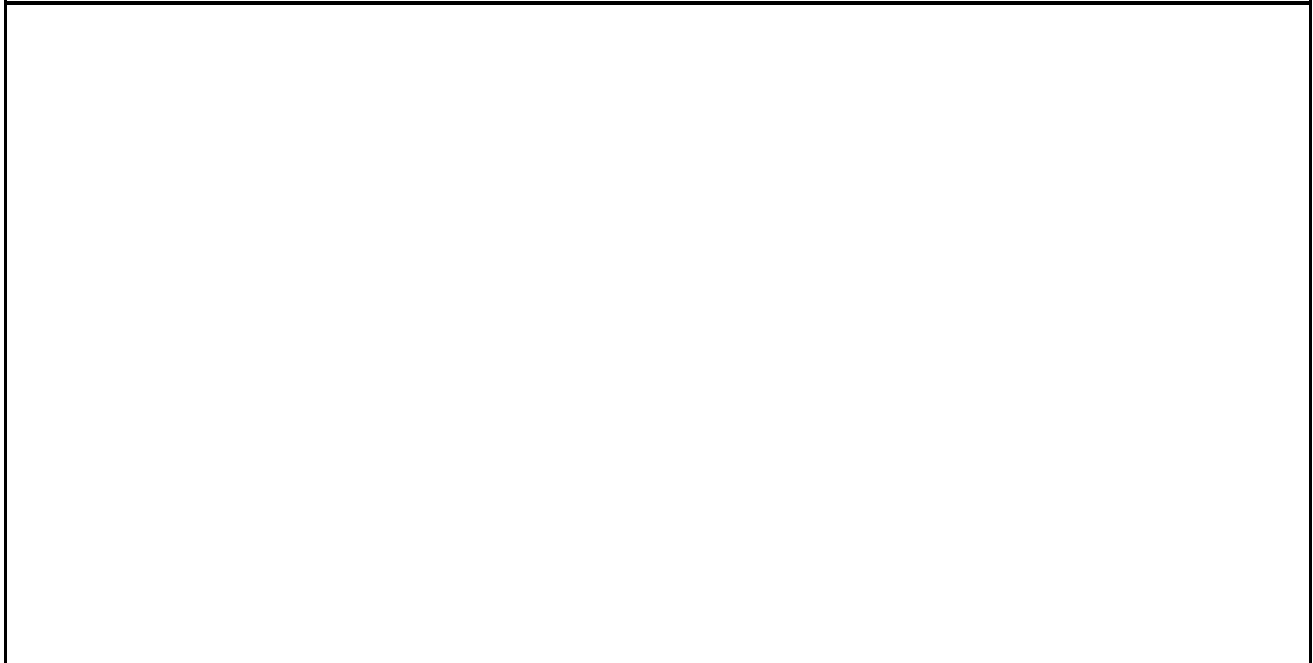
<sup>3</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>4</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-004-0169	<b>Foglio</b> 1            di            26	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
NAVIGLIO LANGOSCO**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 2 di 26				

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL NAVIGLIO LANGOSCO.....</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>12</b>
5.1	Erosione al fondo	12
5.2	Definizione della profondità di posa	14
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>15</b>
6.1	Verifica del gradiente critico	16
6.2	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	17
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>19</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>20</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>d_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>26</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-169	Rev.: 00						N°Doc. Cliente: -
		Foglio	3	di	26		

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Naviglio Langosco, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56"), DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del naviglio che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno, per cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale e di ripristino, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di circa 5 m dal piede esterno dell'arginatura del Naviglio; la profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 3,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 e il tubo camicia verrà sigillata alle estremità con una guaina termorestringente; le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opera finita l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il naviglio.

L'attraversamento del Naviglio Langosco è ubicato in una zona distinta in dettaglio ai F. 36 e 37 del NCT del Comune di Gambolò (PV).

Scopo e finalità del presente studio è verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-169	Foglio 4 di 26					-	

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	5	di	26	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Naviglio Langosco è un canale artificiale, costruito nel XVII secolo con la funzione di irrigare le campagne del novarese e della Lomellina. E' derivato dal fiume Ticino a Galliate, ha una lunghezza di oltre 43 chilometri ed una portata media di 20 mc/sec. con una portata massima derivabile all'opera di presa di 280 mc/sec

Termina nel territorio del Comune di Gambolo' alimentando una serie di rogge minori.



Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (tratta da Google Earth 2012)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-169	Rev.:	00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio 6 di 26					

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa il Naviglio Langosco è un'opera artificiale, non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa, non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si è proceduto alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori comporterebbero il superamento delle arginature con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 120,0 \text{ mc/sec}$$

Si ritiene opportuno eseguire i calcoli anche per un valore di portata pari a quello medio derivato alla bocca di presa:

$$Q_{\text{med}} = 22,70 \text{ mc/sec}$$

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	7	di	26	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL NAVIGLIO LANGOSCO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 80 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegare sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.



METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-169	Foglio 8 di 26					-

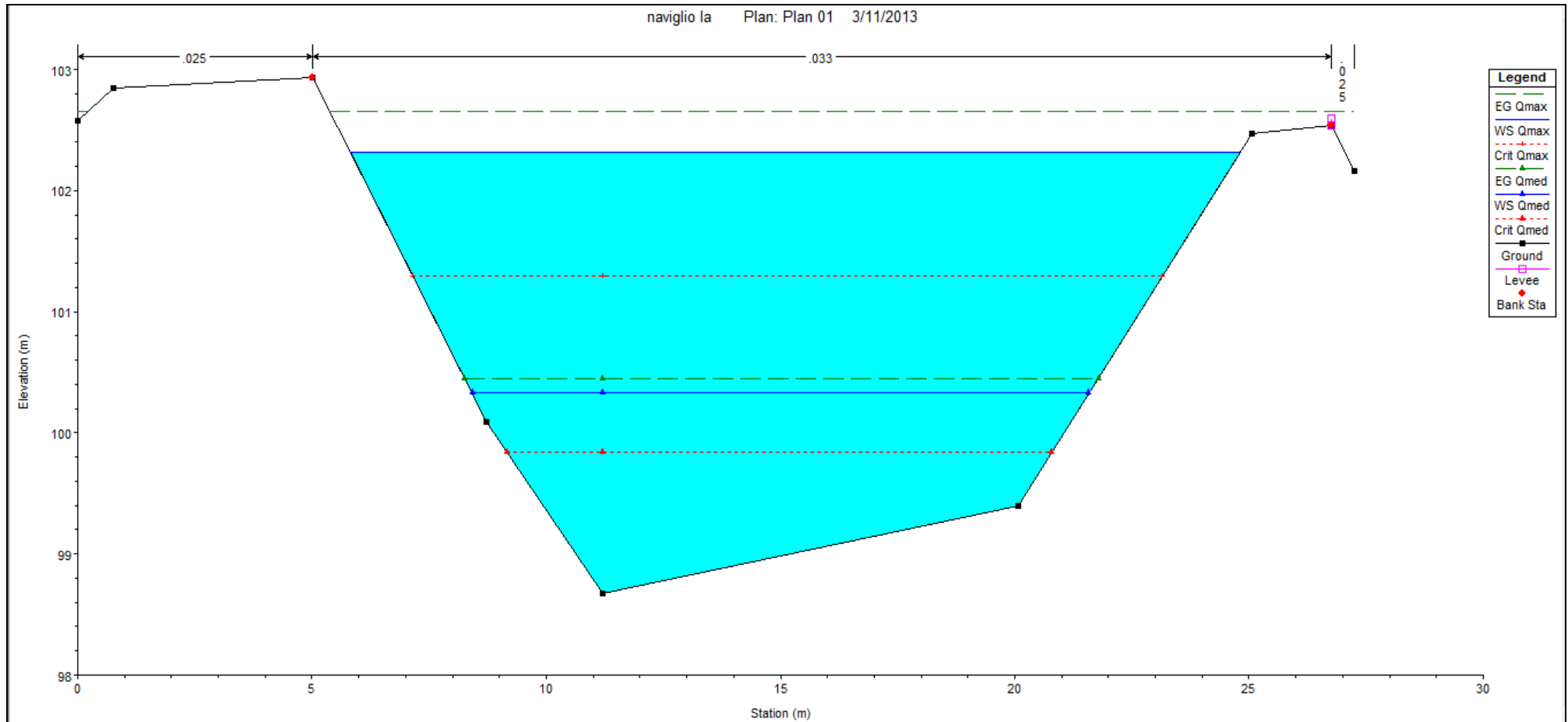


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-169	Foglio 9 di 26			-		

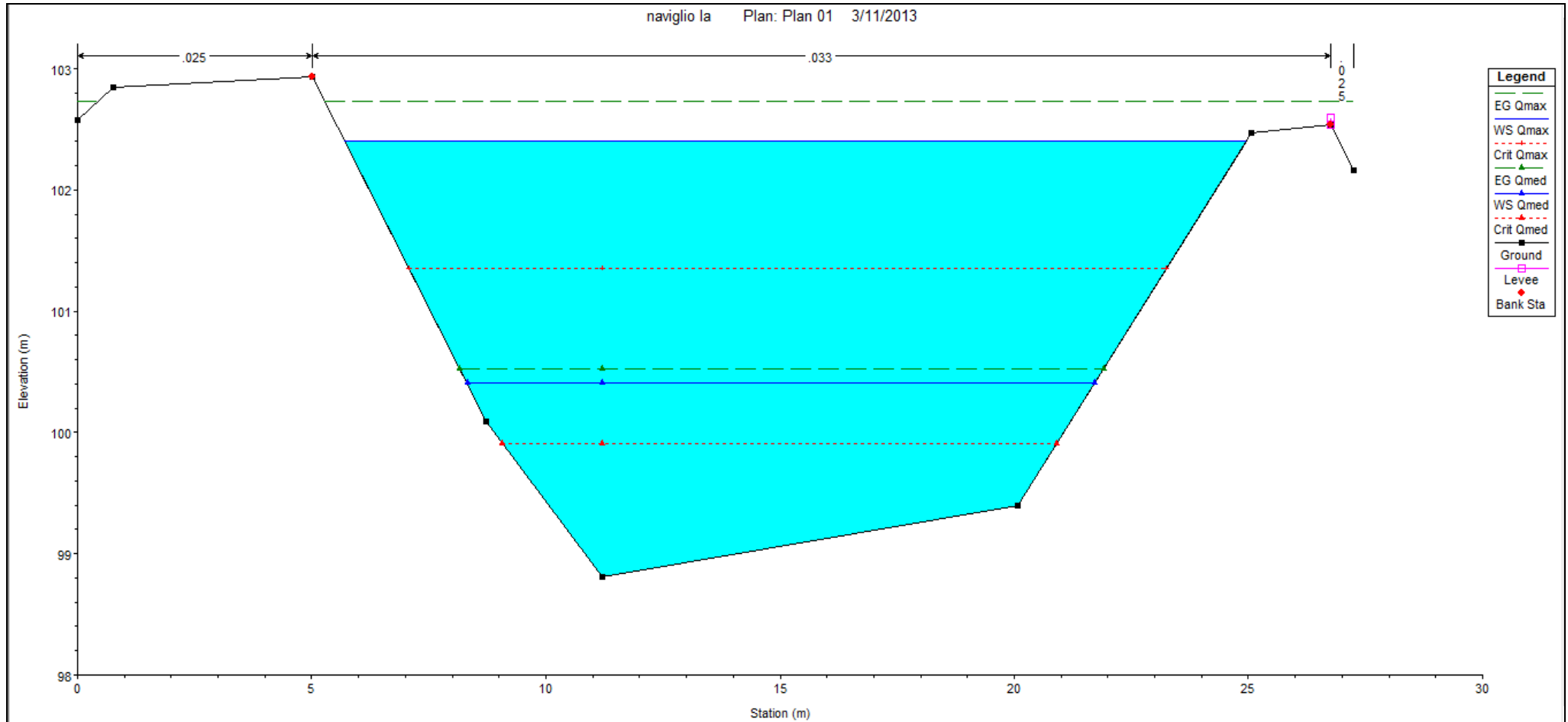


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-169	Foglio 10 di 26			-		

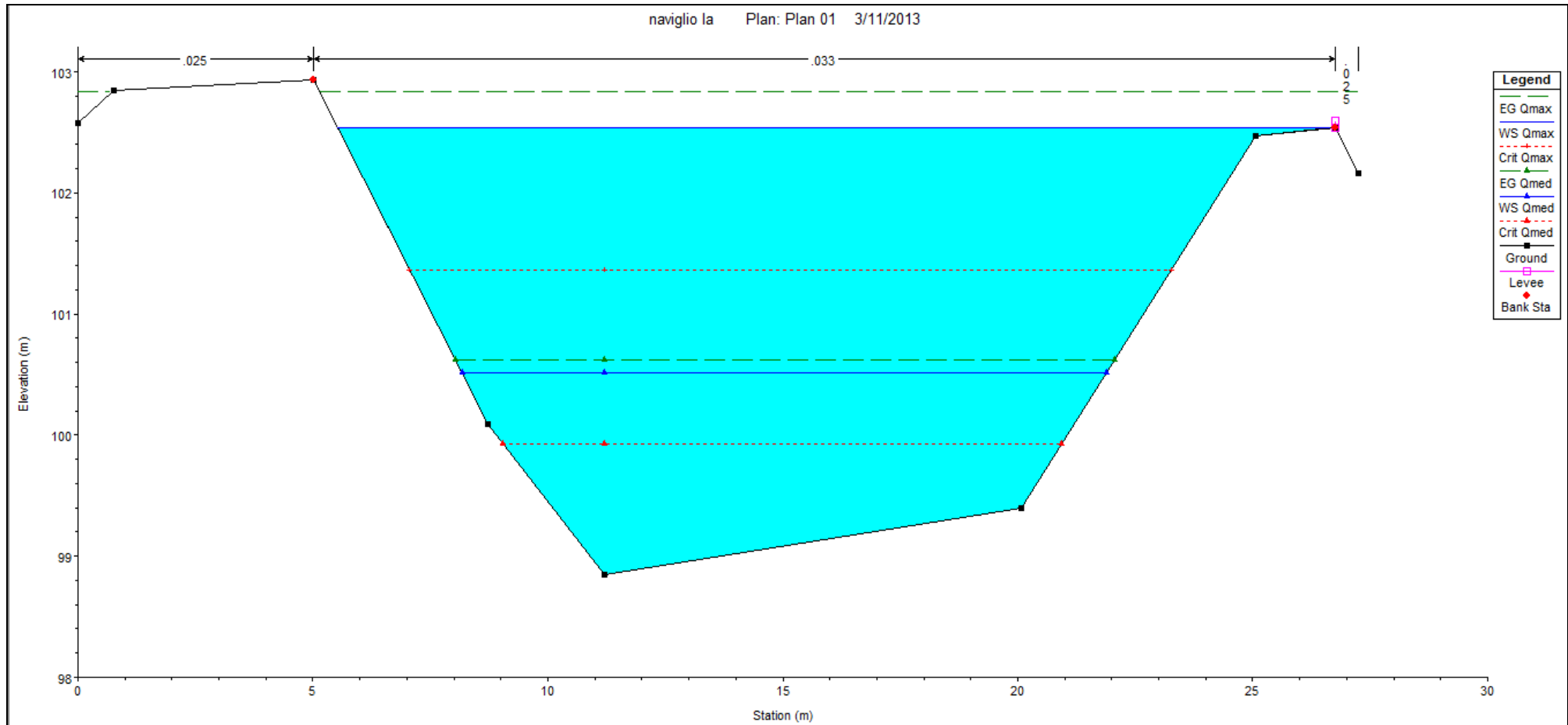


Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar									
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO NAVIGLIO LANGOSCO									
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-004-169		Foglio 11 di 26			-				

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	120	98.85	102.54	101.37	102.83	0.002277	2.41	49.78	21.12	0.5	2.15	48.06
30	22.7	98.85	100.51	99.93	100.62	0.001903	1.42	16.04	13.71	0.42	1.11	20.67
20	120	98.81	102.4	101.35	102.73	0.002388	2.53	47.41	19.25	0.51	2.23	52.34
20	22.7	98.81	100.41	99.91	100.53	0.002413	1.54	14.78	13.39	0.47	1.05	24.79
10	120	98.67	102.32	101.29	102.66	0.002502	2.58	46.54	18.99	0.53	2.22	54.43
10	22.7	98.67	100.33	99.84	100.45	0.002502	1.56	14.54	13.16	0.47	1.05	25.64

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	12	di	26	

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata massima sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 13 di 26					

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 1,62 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 1,62 * 1,50 = 2,43 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 14	di	26		

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b_{max}} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b_{max}}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	8,90
<b>Y</b>	3,59
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	1,24
<b>β<sub>c</sub></b>	12,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a 2,43 m**, poiché il progetto prevede di posare il tubo camicia con la generatrice superiore **ad una profondità di m. 3,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 15 di 26					

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici o modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo, ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica (il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere). Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 16 di 26				

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica del percorso di filtrazione equivalente

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>3</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

La verifica viene condotta rispetto al piano campagna al piede dell'arginatura, nell'ipotesi che il Naviglio Langosco sia pieno al massimo livello (dislivello rispetto al piano campagna  $\Delta h_{max} = 0,38$  m).

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 3)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>4</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Nel caso in esame si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

<sup>3</sup> Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un'ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

<sup>4</sup> Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all'80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0169	Foglio		17	di	26	

$\Delta h$ [m]	0,38
$L_{1-2-3}$ [m]	17,00
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	1,5 <sup>5</sup>
$i_{cr} / i$	17,89

Tabella 6: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_t \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a 45°) vengono inserite nel

---

5 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni di perforazione, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
			Foglio	18	di	

conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

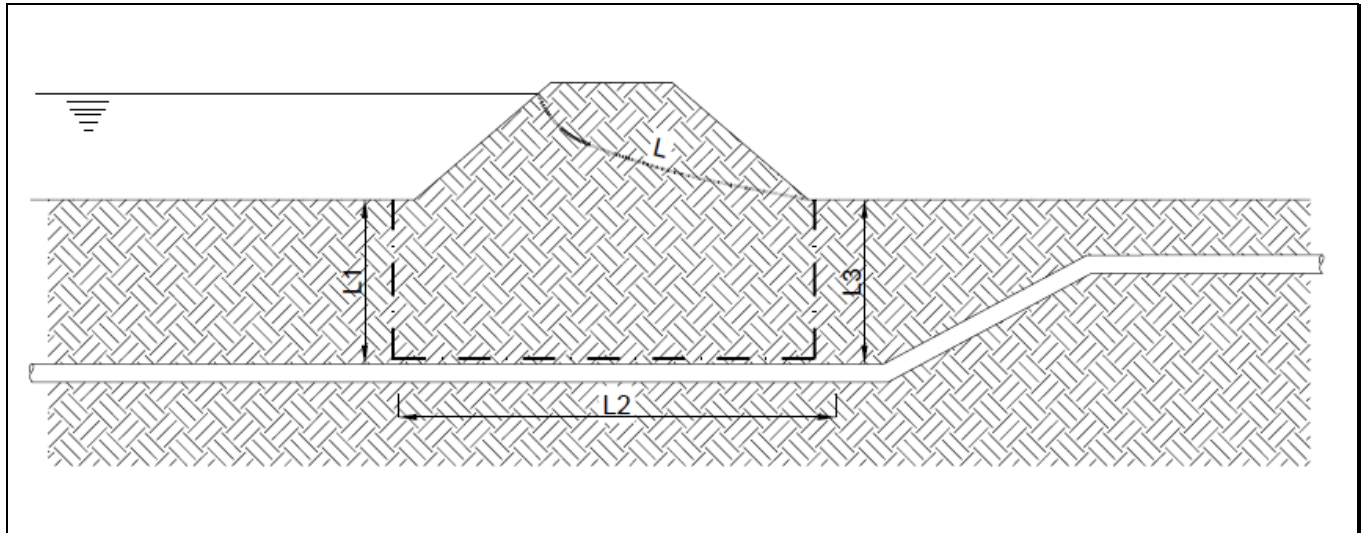


Figura 3: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

Assumendo le stesse ipotesi viste al punto precedente, il dislivello massimo risulta di 0,38 m.

Risulta quindi:

L1 [m]	3,00
L2 [m]	7,20
L3 [m]	6,80
L [m]	5,00
$L_t > 1,2L$	Ok
$0,1xL$	0,5

Tabella 4: verifica del percorso equivalente

Essendo sempre  $L1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$  la verifica è ampiamente soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	19	di	26	

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Naviglio Langosco che, si ricorda, verrà eseguito la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene, con la generatrice superiore ad una profondità di m. 3,00 rispetto al punto più depresso del fondo alveo

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente anni con un coefficiente di sicurezza superiore a 1,50;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento sia a breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	20	di	26	

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 21 di 26				

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al naviglio principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e naviglio principale;
- larghezza del pelo libero;

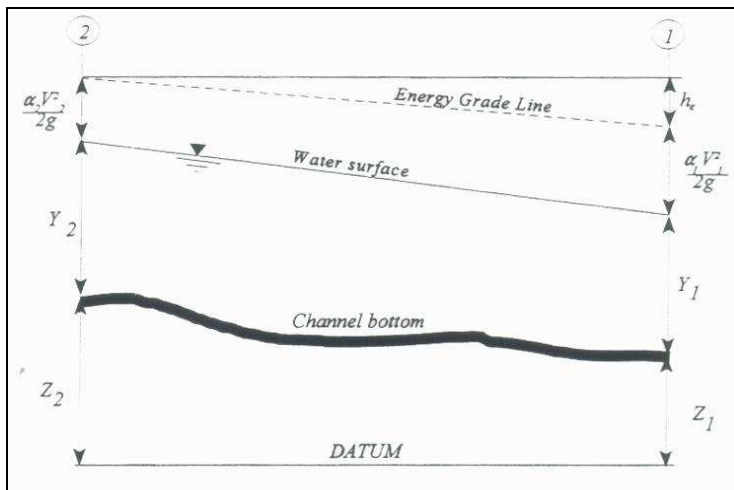
<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	22	di	26	

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 4).



Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 23	di	26		

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il naviglio di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

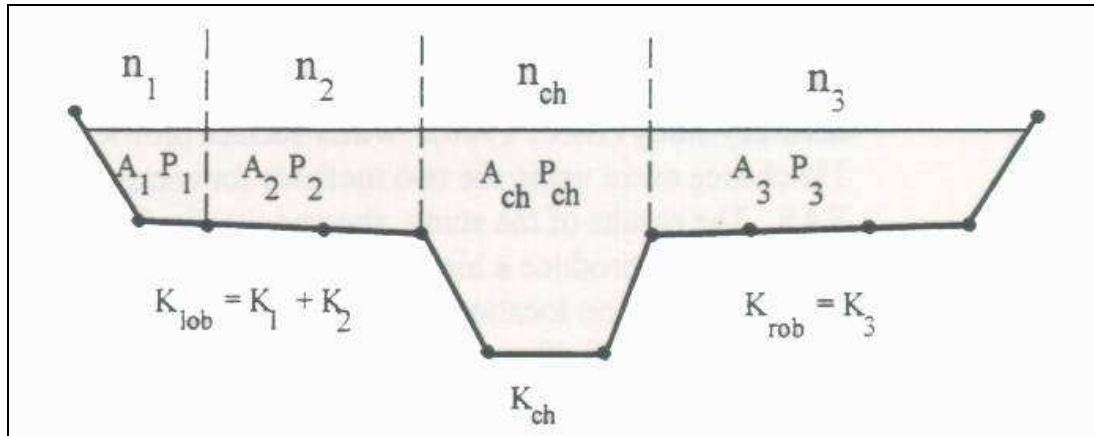
Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
	Foglio 24 di 26					

Nel naviglio principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).



Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0169	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	25	di	26	

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

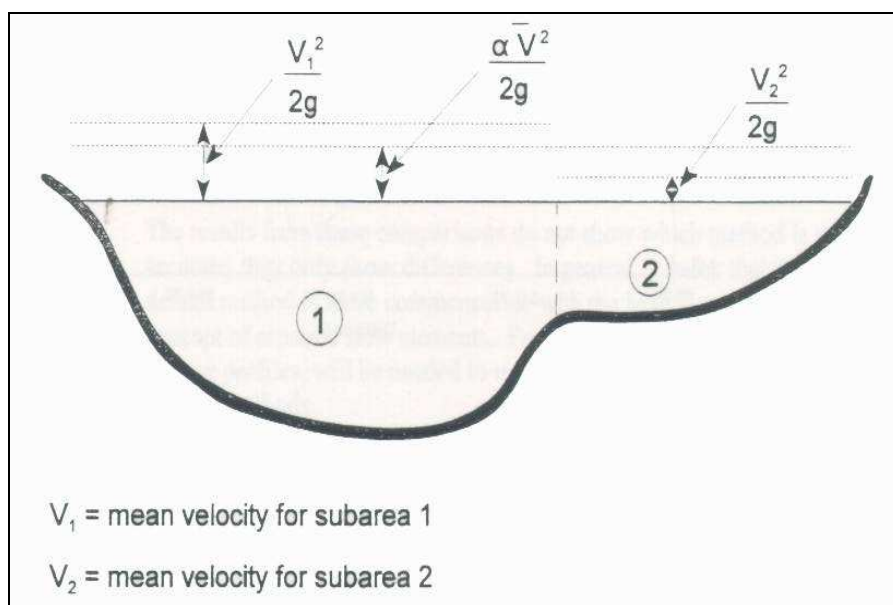
dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, naviglio principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, naviglio principale e golena destra.



Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA NAVIGLIO LANGOSCO</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0169	Foglio 26 di 26					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

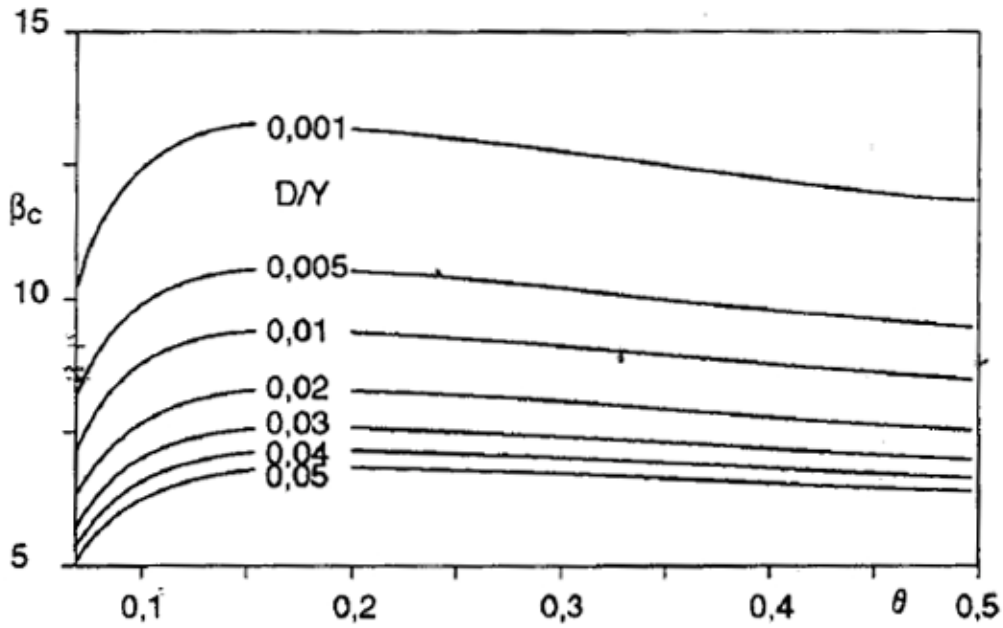


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^6$

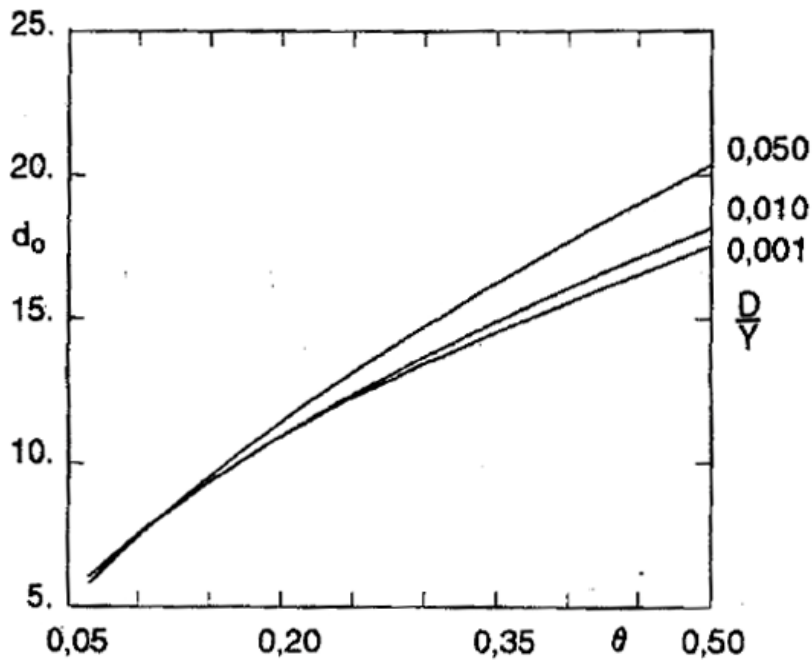


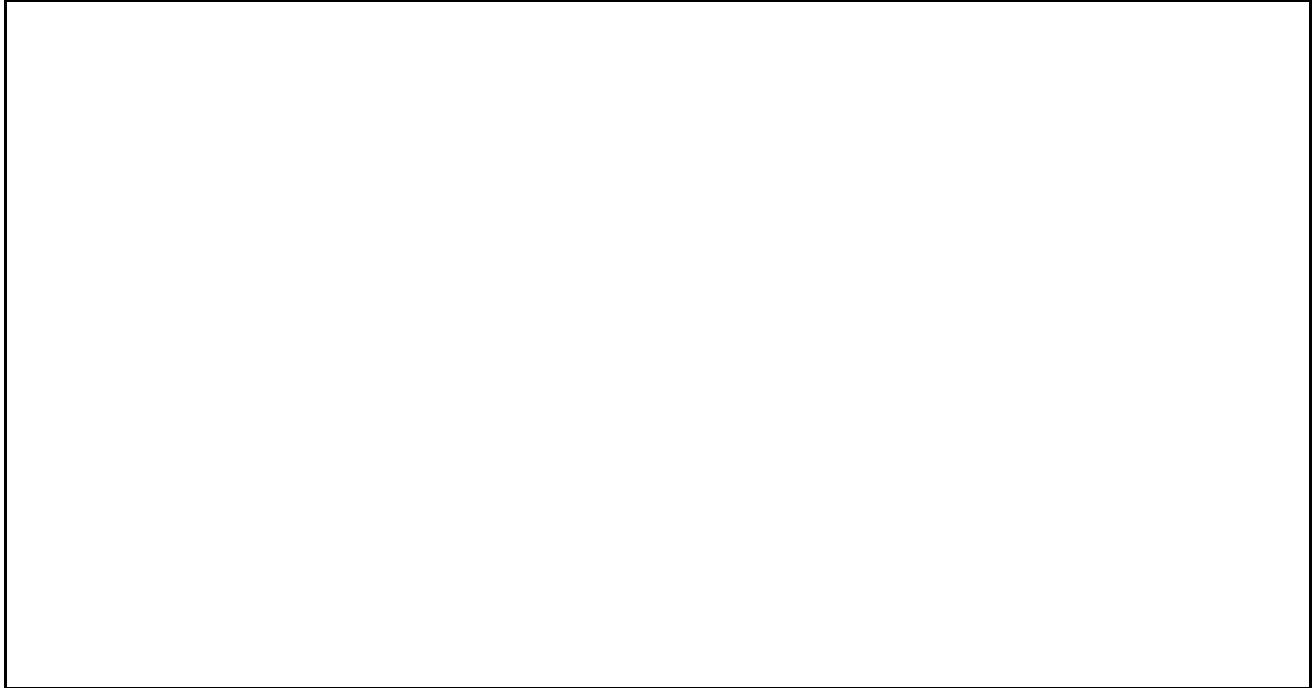


Tabella per la determinazione di  $d_0^7$

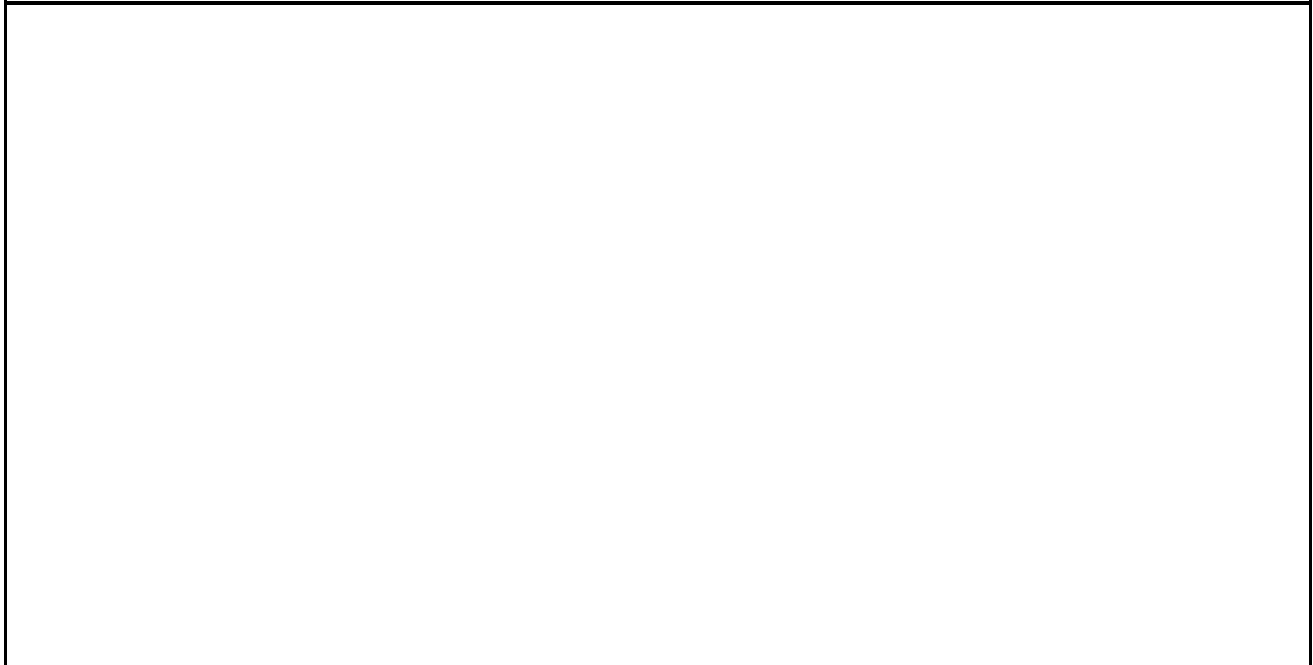
<sup>6</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Ciente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-004-0165	<b>Foglio</b> 1            di            27	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA  
SUBDIRAMATORE PAVIA**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 2 di 27				

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL SUBDIRAMATORE PAVIA .....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>13</b>
5.1	Erosione al fondo	13
5.2	Definizione della profondità di posa	15
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>16</b>
6.1	Verifica del gradiente critico	17
6.2	Verifica del percorso di filtrazione equivalente	18
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>20</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>21</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>d_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>27</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		3	di		27

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Subdiramatore sinistro del Canale Cavour, detto Subdiramatore Pavia, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") facente parte del 4° tronco della nuova linea DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del canale che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno pur cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisoriale e di ripristino, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di circa 6 m dal piede dell'arginatura del Canale. La profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 3,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il tubo camicia verrà sigillata alle estremità con una guaina termorestringente mentre le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opere finite l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il canale.

L'attraversamento del Canale subdiramatore Pavia è ubicato in una zona distinta in dettaglio al F. 25 del NCT del Comune di Gambolò (PV).

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da una parte l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altra che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 4 di 27					

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio	5	di	27	

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Canale subdiramatore Pavia è una canale artificiale lungo circa 50 km che deriva le acque dal diramatore Quintino Sella che, a sua volta, le deriva dal Canale Cavour. Quest'ultimo, realizzato in soli 3 anni dal 1863 al 1866, è derivato dal Po a Chivasso, integrato con le acque della Dora Baltea, a mezzo del canale sussidiario Farini, nei pressi di Saluggia, e sfocia in Ticino dopo un percorso di 86 chilometri. Il diramatore Quintino Sella deriva dal Canale Cavour una portata di complessivi 32 mc/sec che distribuisce lungo il suo percorso per usi irrigui e industriali, consegnando l'intera portata residua al diramatore Mortara (7 mc/sec) e Diramatore Pavia ( 15 mc/sec).

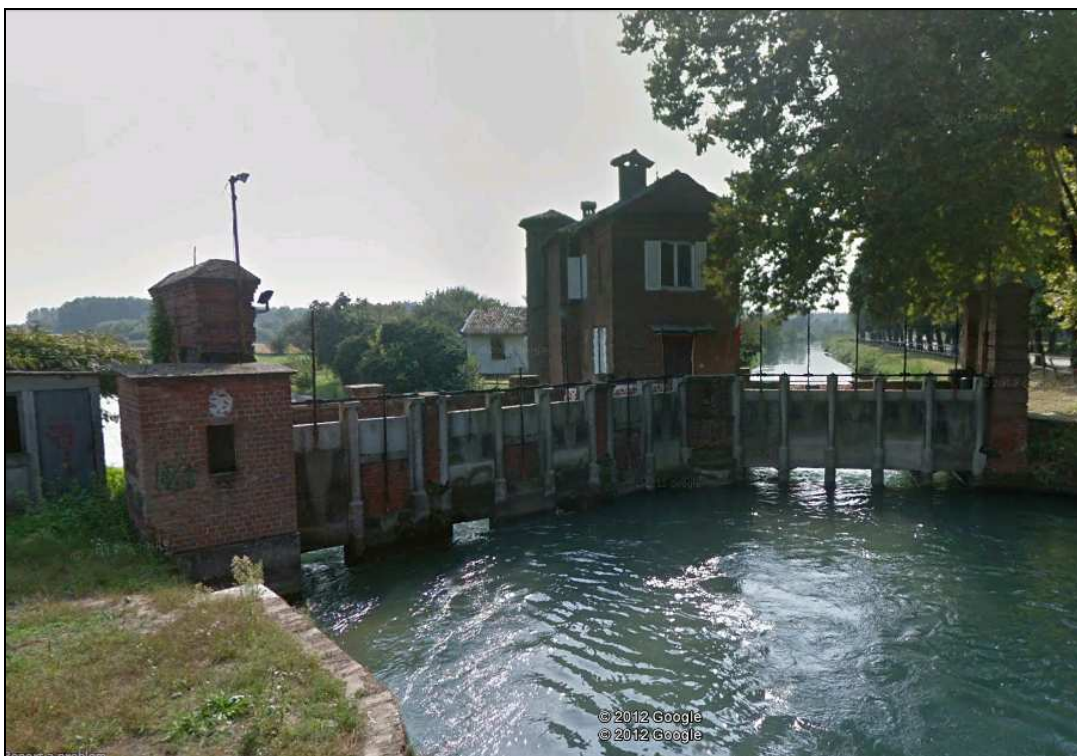


Figura 1: Sezione terminale del Canale Quintino Sella con inizio dei due canali Sub. Pavia e Sub. Mortara



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-165	Foglio 6 di 27			-		

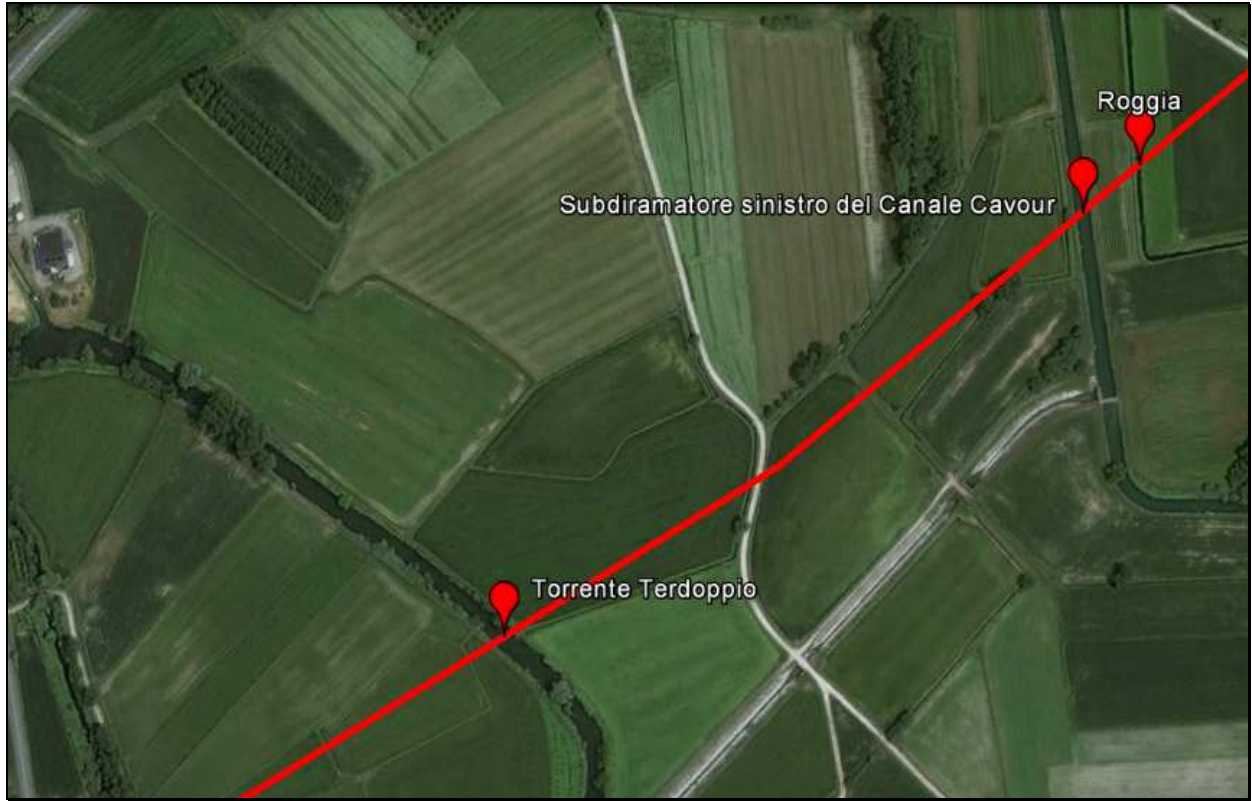


Figura 2: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (tratta da Google Earth)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		7	di	27	

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato in premessa, il Canale Subdiramatore Pavia è un opera artificiale che riceve le acque da due canali anch'essi artificiali.

Non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata quindi sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si è proceduto alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento con un franco di sicurezza di 50 cm.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori determinerebbero il superamento delle arginature, con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni, pertanto, ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente, nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 32,0 \text{ mc/sec}$$

Si ritiene opportuno eseguire i calcoli anche per un valore di portata pari a quello medio derivato alla bocca di presa:

$$Q_{\text{med}} = 22,70 \text{ mc/sec}$$

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	8	di	27	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL SUBDIRAMATORE PAVIA

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 150 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegare sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-165	Foglio 9 di 27			-		

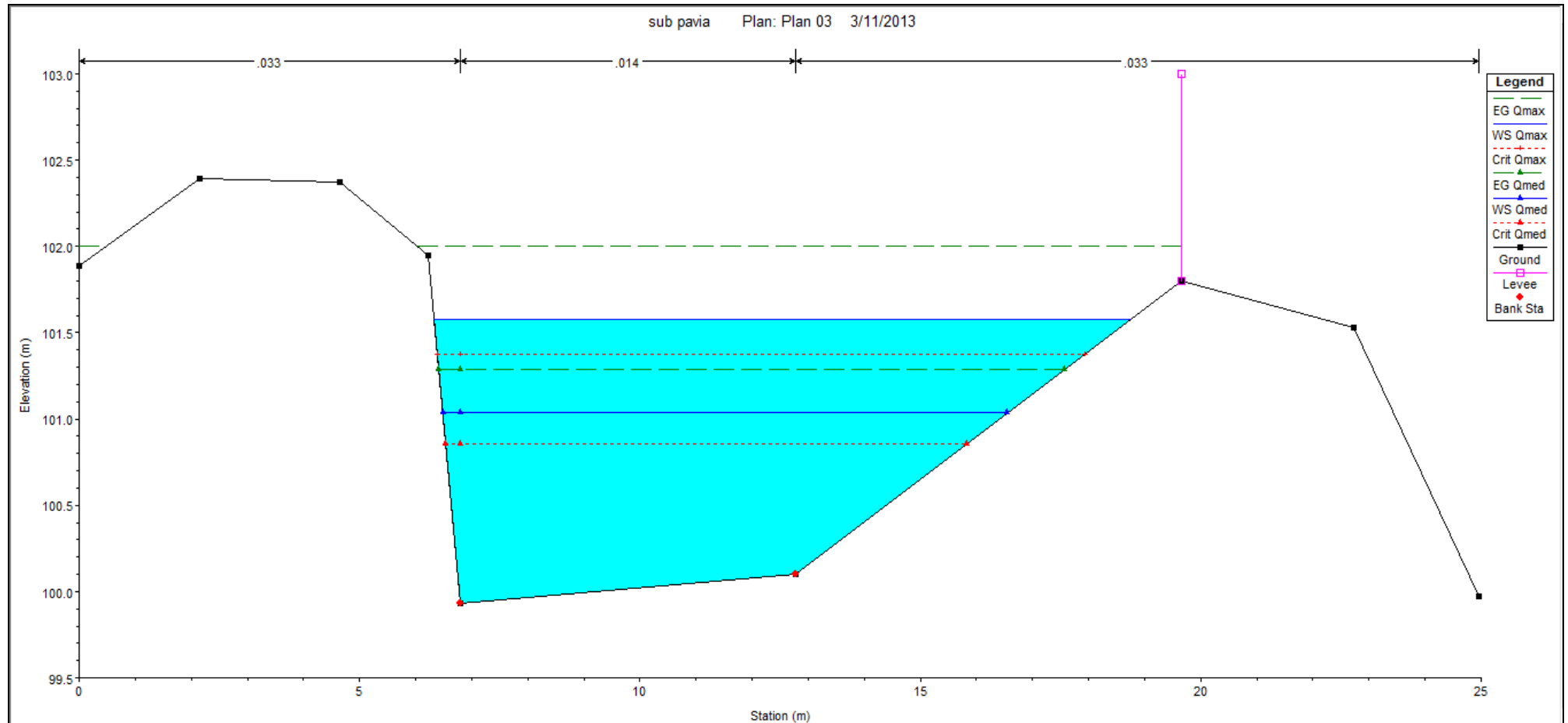


Figura 3.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-165	Foglio 10 di 27			-		

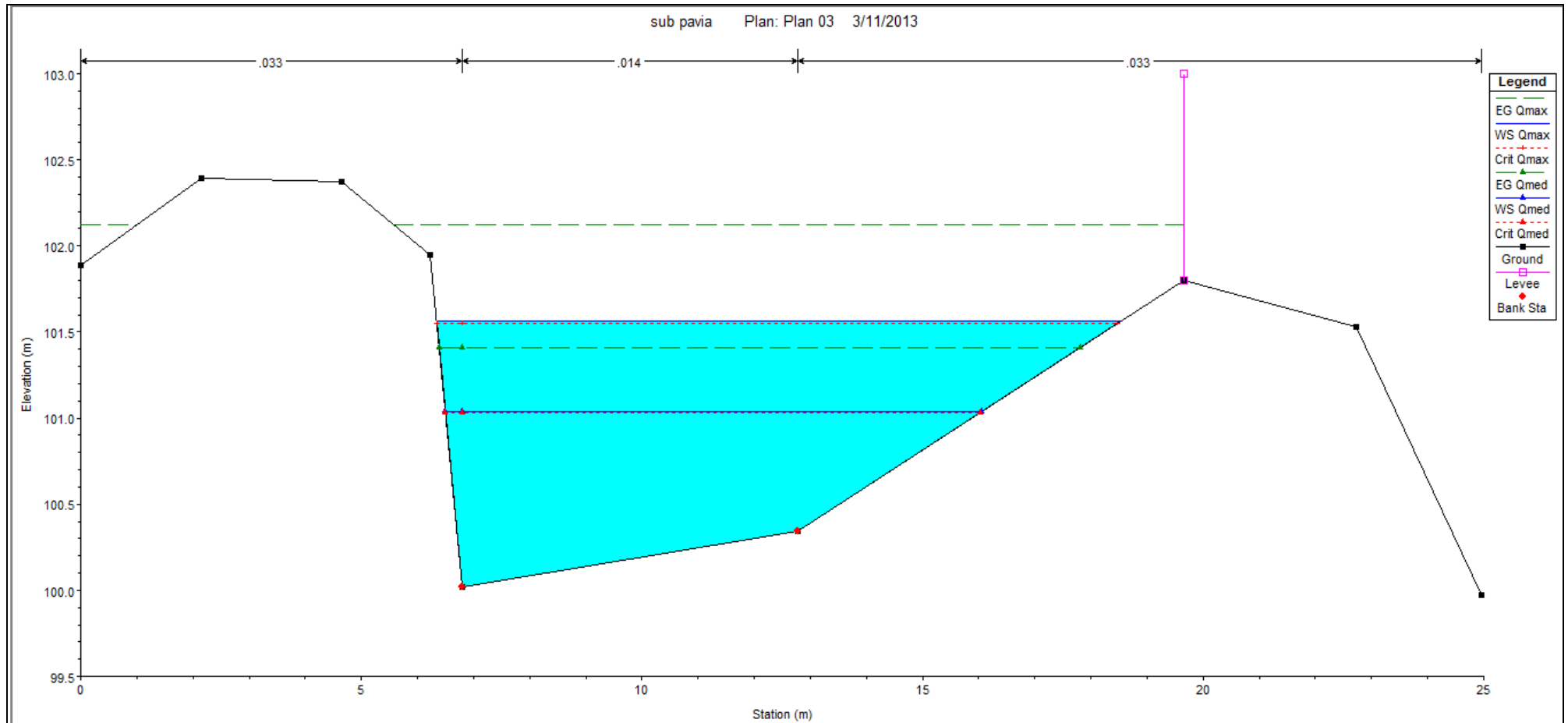


Figura 3.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-165	Foglio 11 di 27			-		

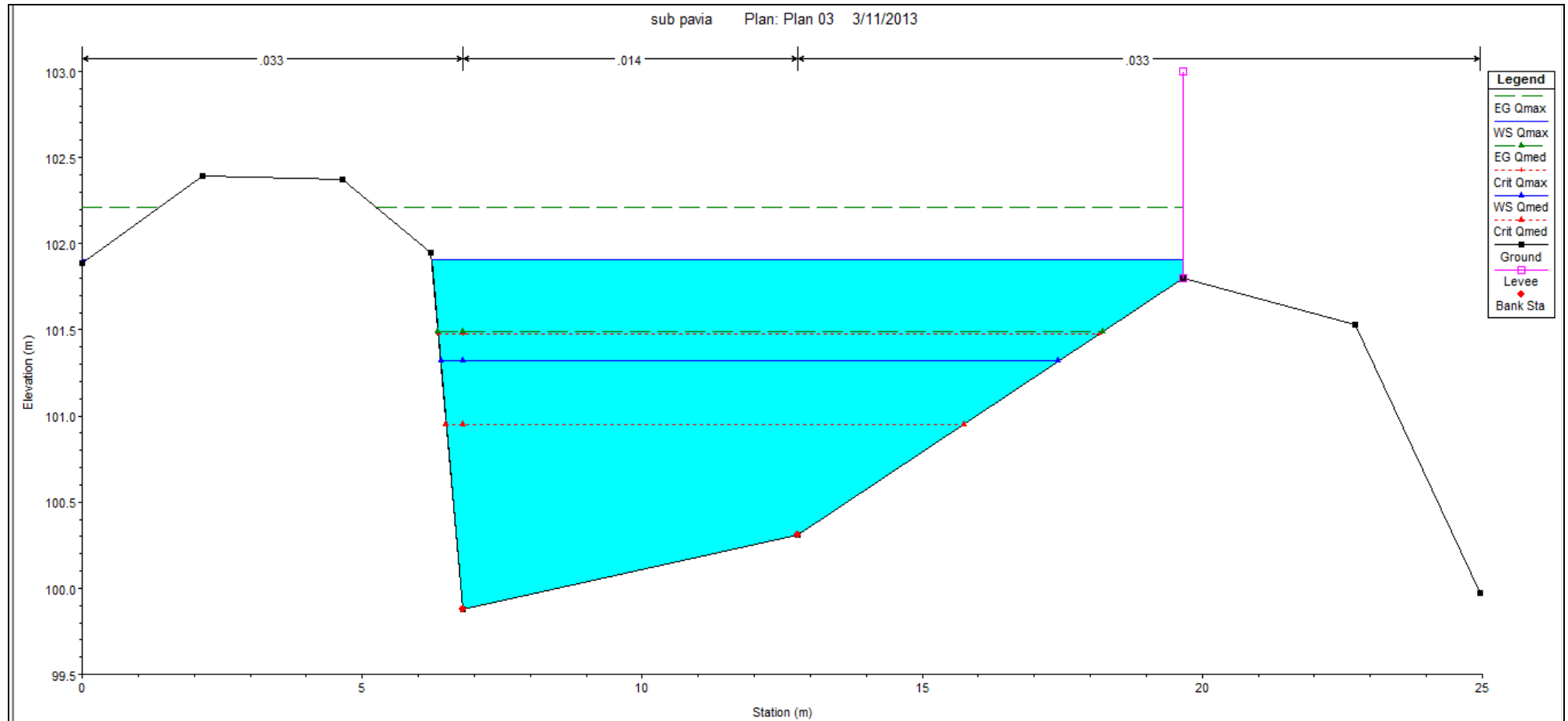


Figura 3.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar									
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE PAVIA									
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:	
J01811-PPL-RE-004-165		Foglio 12 di 27			-				

Sezione	Q [mc/sec]	Q. fondo [m.s.m.]	Q. acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]	$\tau$ [N/mq]
30	32	99.88	101.91	101.48	102.21	0.000592	2.58	17.29	13.49	0.61	1.13	10.51	6.54
30	15	99.88	101.32	100.95	101.49	0.000543	1.9	9.94	11.02	0.55	0.81	6.5	4.32
20	32	100.02	101.56	101.55	102.13	0.001564	3.5	12.11	12.18	0.95	0.9	21.13	13.78
20	15	100.02	101.03	101.03	101.41	0.001875	2.78	6.4	9.55	0.96	0.62	15.69	11.32
10	32	99.93	101.58	101.38	102	0.001	3.04	14.16	12.42	0.78	1.02	15.34	10.02
10	15	99.93	101.03	100.86	101.28	0.001	2.29	8.04	10.07	0.72	0.73	10	7.15

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 13 di 27				

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata massima sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle. Si trascura a favore di sicurezza la presenza del rivestimento di fondo in cls presente in questo tratto di canale.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	14	di	27	

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 0,90 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 0,90 * 1,50 = 1,35 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0165	Foglio		15	di	27	

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	10,30
<b>Y</b>	1,70
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	3,00
<b>βc</b>	11,00
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a circa 1,35 m**, poiché il progetto prevede di posare il tubo camicia con la generatrice superiore ad una **profondità di m. 3,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 16 di 27				

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è funzione a sua volta del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici, o a modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere.

Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si è ritenuto sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 17	di	27		

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica del percorso di filtrazione equivalente

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>3</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

Si evidenzia che nella zona dell'attraversamento in progetto il Canale Sub. Pavia presenta una arginatura poco pronunciata rispetto al piano campagna, la verifica viene pertanto condotta rispetto al fondo dell'adiacente Cavo Irrigatore distretto Gambolò destro, nell'ipotesi (assolutamente cautelativa) che quest'ultimo sia momentaneamente asciutto mentre il Canale Sub. Pavia sia pieno al massimo livello.

In tal modo si viene ad avere una differenza di livello di 1,83 m.

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 4)
- $i_{cr} = \gamma_t / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>4</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

3 Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

4 Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all' 80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	18	di	27	

Nel caso in esame si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

$\Delta h$ [m]	1,83
$L_{1-2-3}$ [m]	13,45
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	1,5 <sup>5</sup>
$i_{cr} / i$	2,93

Tabella 6: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_1 \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

---

5 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni scavo, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
	Foglio 19 di 27					

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a  $45^\circ$ ) vengono inserite nel conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

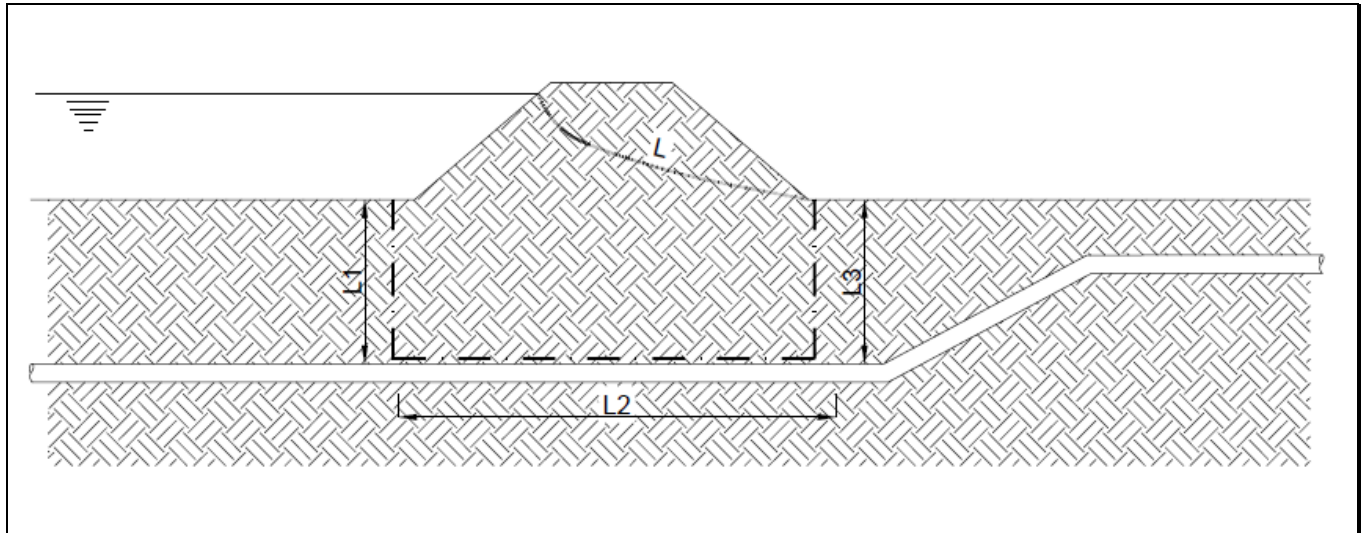


Figura 4: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

Assumendo le stesse ipotesi viste al punto precedente, il dislivello massimo risulta di 1,83 m.

Risulta quindi:

L1 [m]	3,30
L2 [m]	7,20
L3[m]	2,95
L [m]	7,15
0,1xL	0,71
$L_t > 1,2L$	Ok

Tabella 6: verifica del percorso equivalente

Poiché risulta sempre  $L_1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$ , la verifica è sempre soddisfatta.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 20 di 27				

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Canale Subdiramatore Pavia che, si ricorda, verrà eseguito la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene, ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 3,00.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente anni con un coefficiente di sicurezza superiore a 1,50;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento sia nella fase realizzativa che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
Foglio 21 di 27							

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	22	di	27	

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

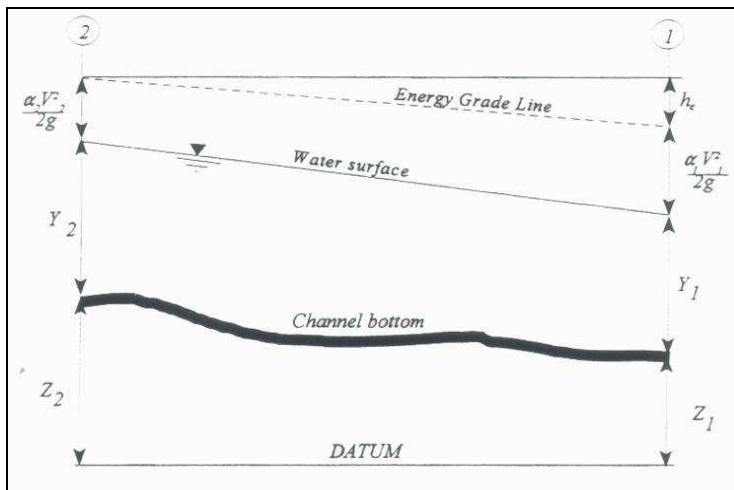
<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	23	di	27	

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 4).



Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0165	Foglio 24 di 27					

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il canale di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

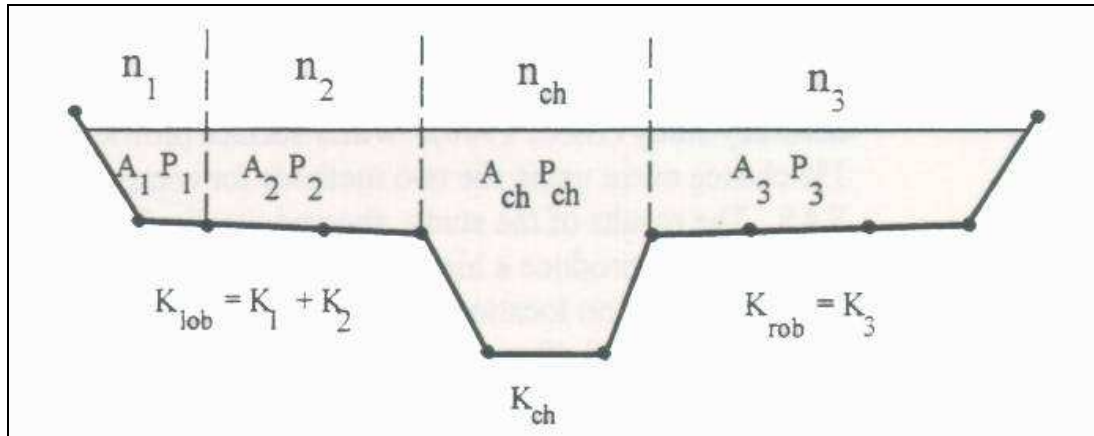
Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 25	di	27		

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).



Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0165	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	26	di	27	

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

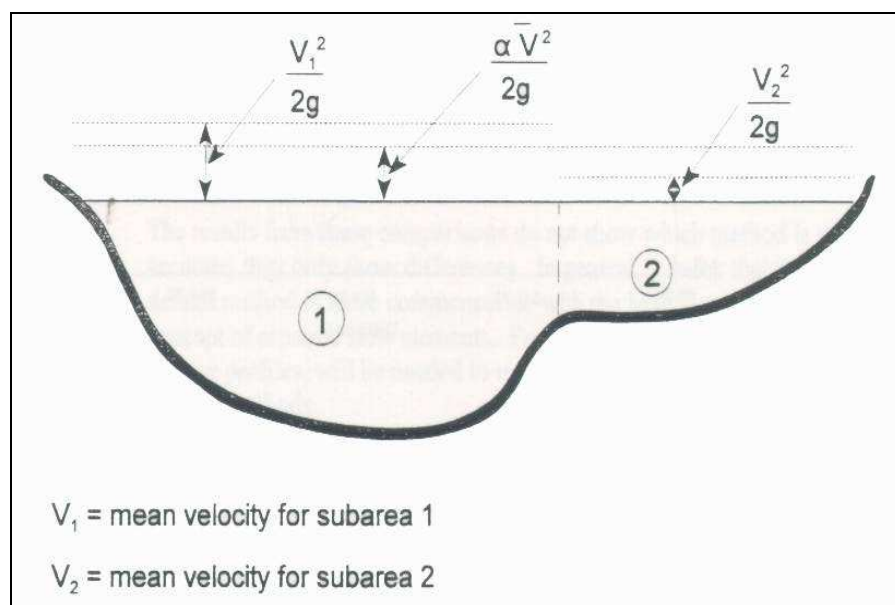
dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.



Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE PAVIA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0165	Foglio 27 di 27					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

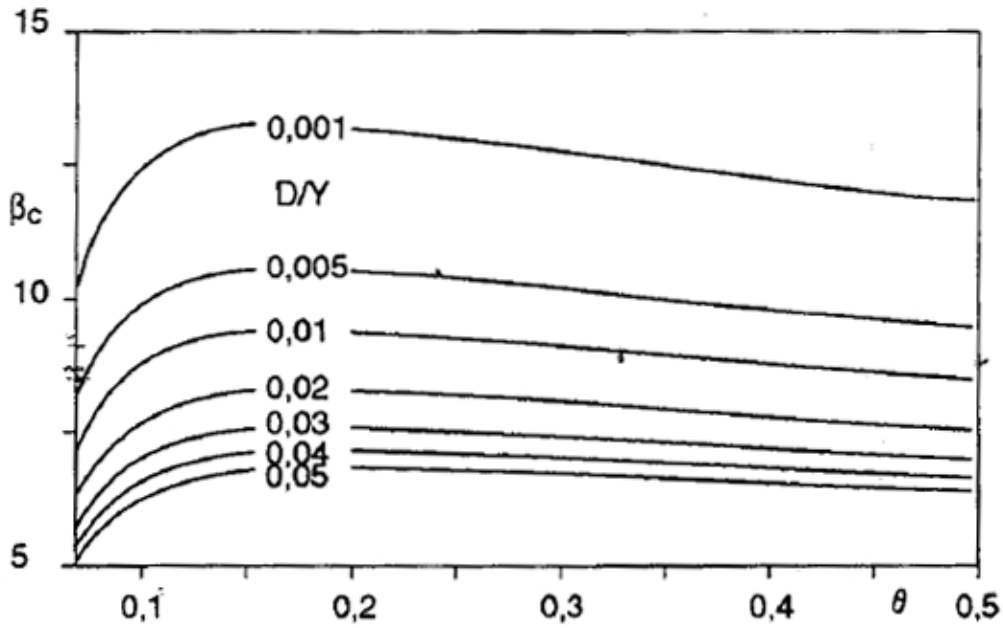


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^6$

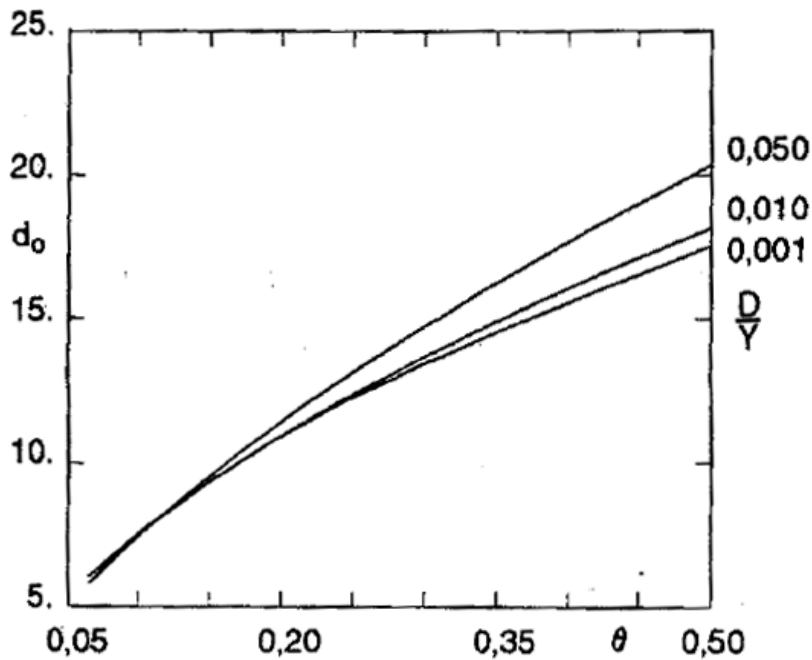


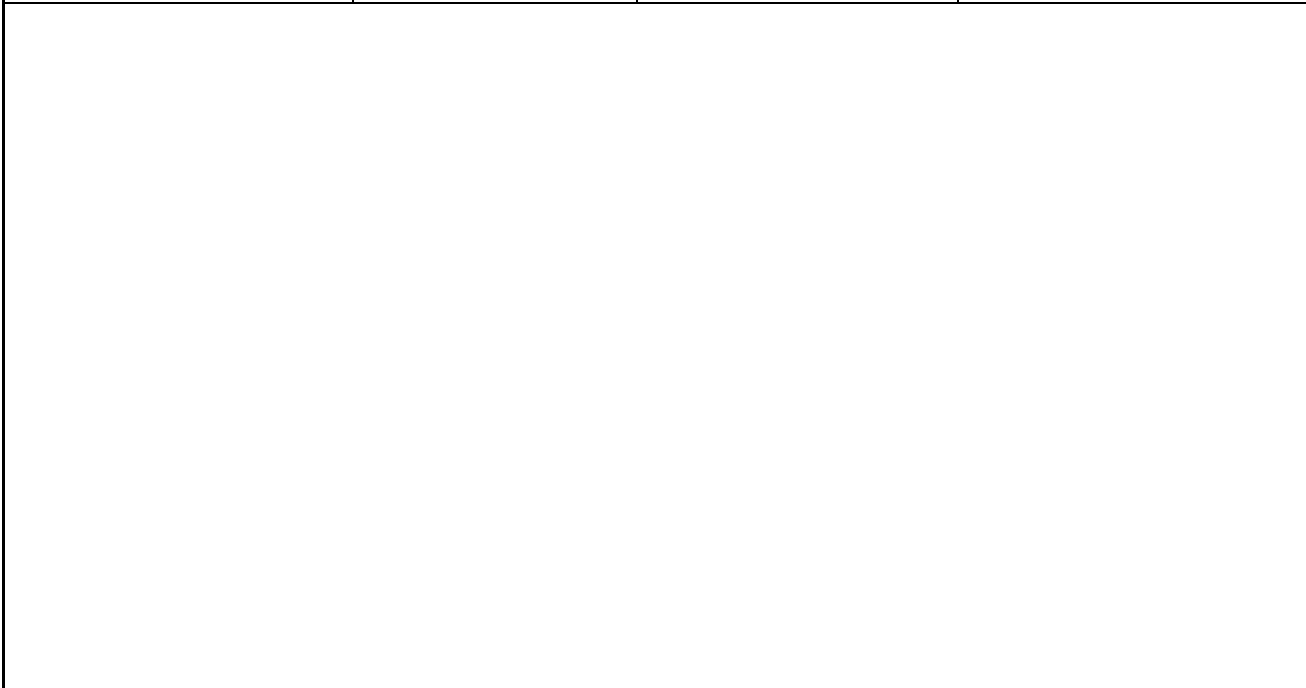


Tabella per la determinazione di  $d_0^7$

<sup>6</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>7</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA</b> <b>DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-004-0179	<b>Foglio</b> 1          di          30	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA**  
**SUBDIRAMATORE MORTARA**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	STROPPA	FRASSINELLI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-179	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio	2	di	30	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL CANALE MORTARA.....</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>13</b>
<b>5.1</b>	<b>Erosione al fondo</b>	<b>13</b>
<b>5.2</b>	<b>Definizione della profondità di posa</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>18</b>
<b>6.1</b>	<b>Verifica del gradiente critico</b>	<b>19</b>
<b>6.2</b>	<b>Verifica del percorso di filtrazione equivalente</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>22</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>23</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_o</math> E <math>\beta_c</math></b>	<b>29</b>
	<b>ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>1</sup></b>	<b>30</b>

---

<sup>1</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuild, Olanda, 1985



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-179	Rev.: 00						N°Doc. Cliente: -
		Foglio 3		di 30			

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Subdiramatore destro del Canale Cavour, detto Subdiramatore Mortara, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo del canale che, stante la sua natura irrigua-industriale, è caratterizzato da presenza di un flusso significativo durante tutti i mesi dell'anno per cui una sua interruzione renderebbe necessaria la realizzazione di opere provvisorie, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza non inferiore a 5,00 m dal piede dell'arginatura del Canale, con una profondità di posa che, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge 3,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il tubo camicia verrà sigillata alle estremità con una guaina termorestringente mentre le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opere finite l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con il canale e le sue pertinenze.

L'attraversamento del Canale è ubicato in una zona distinta in dettaglio al F. 33 del NCT del Comune di Mortara (PV).

Scopo e finalità del presente studio è verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito di portate significative, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-179	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		4	di	30	

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-179	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio 5 di 30				

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Canale subdiramatore Mortara è una canale artificiale lungo 13,5 km che deriva le acque dal diramatore Quintino Sella che, a sua volta, le deriva dal Canale Cavour. Quest'ultimo, realizzato in soli 3 anni dal 1863 al 1866, è derivato dal Po a Chivasso, integrato con le acque della Dora Baltea, a mezzo del canale sussidiario Farini, nei pressi di Saluggia, e sfocia in Ticino dopo un percorso di 86 chilometri. Il diramatore Quintino Sella deriva dal Canale Cavour una portata di complessivi 32 mc/sec che distribuisce lungo il suo percorso per usi irrigui e industriali, consegnando l'intera portata residua al diramatore Mortara (7 mc/sec) e Diramatore Pavia ( 15 mc/sec).

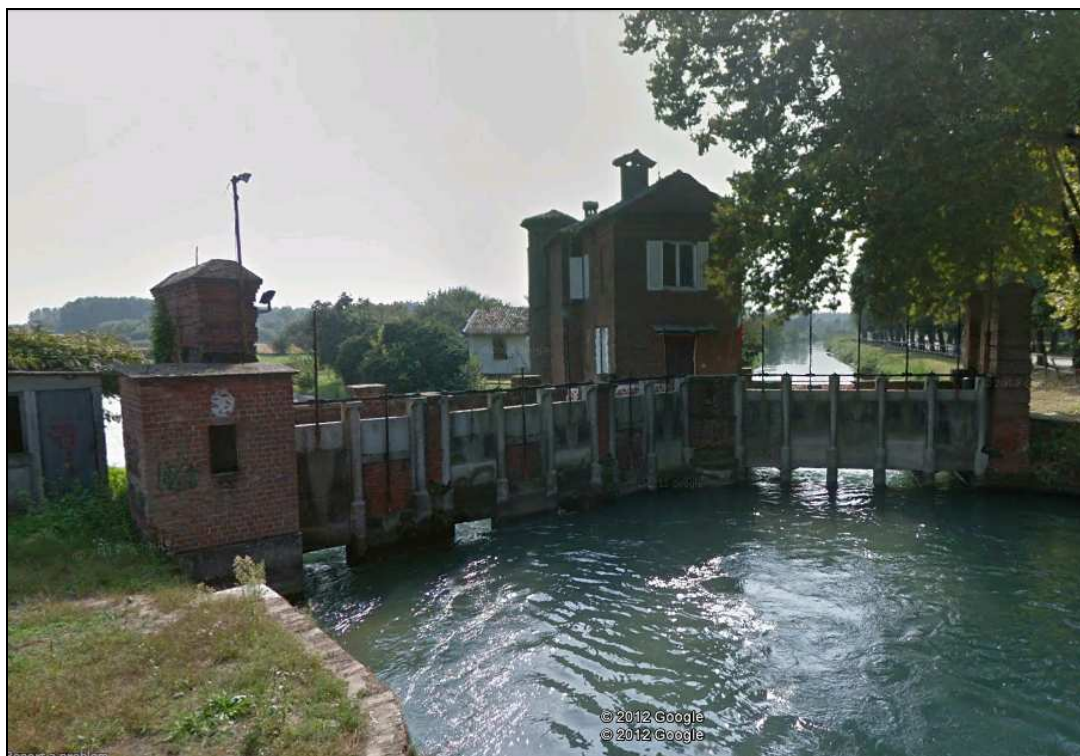


Figura 1: Sezione terminale del Canale Quintino Sella con inizio dei due canali Sub. Pavia e Sub. Mortara

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-179	Foglio 6 di 30			-		

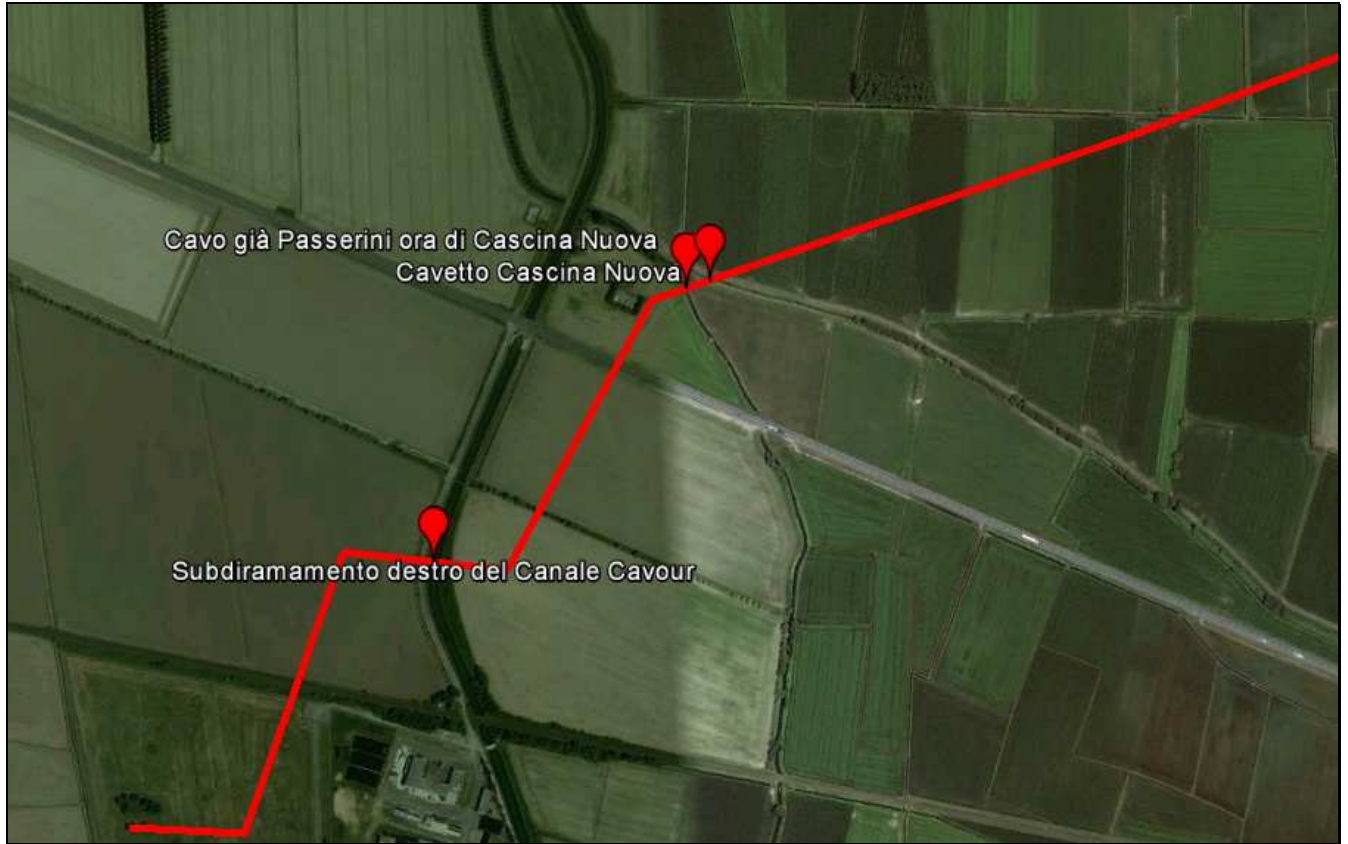


Figura 2: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (da Google Earth 2012)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-179	Rev.:	00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio		7	di	30	

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Come accennato, in premessa il Canale Mortara è un'opera artificiale che riceve le acque da canali anch'essi artificiali, non risulta quindi possibile effettuare un'analisi idrologica tradizionale, basata cioè sulla determinazione della portata di progetto partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.).

Trattandosi di un canale artificiale, non sono inoltre presenti stazioni idrometriche ufficiali che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si procederà alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento.

Di fatto, tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto per portate superiori si avrebbe il superamento delle arginature con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale.

In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene in tal modo:

$$Q_{\max} = 19,0 \text{ mc/sec}$$

Si ritiene opportuno eseguire i calcoli anche per un valore di portata pari a quello medio derivato alla bocca di presa:

$$Q_{\text{med}} = 7,0 \text{ mc/sec}$$

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-179	Foglio 8 di 30					-

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL CANALE MORTARA

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 150 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegare sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tab. 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-179	Foglio 9 di 30			-		

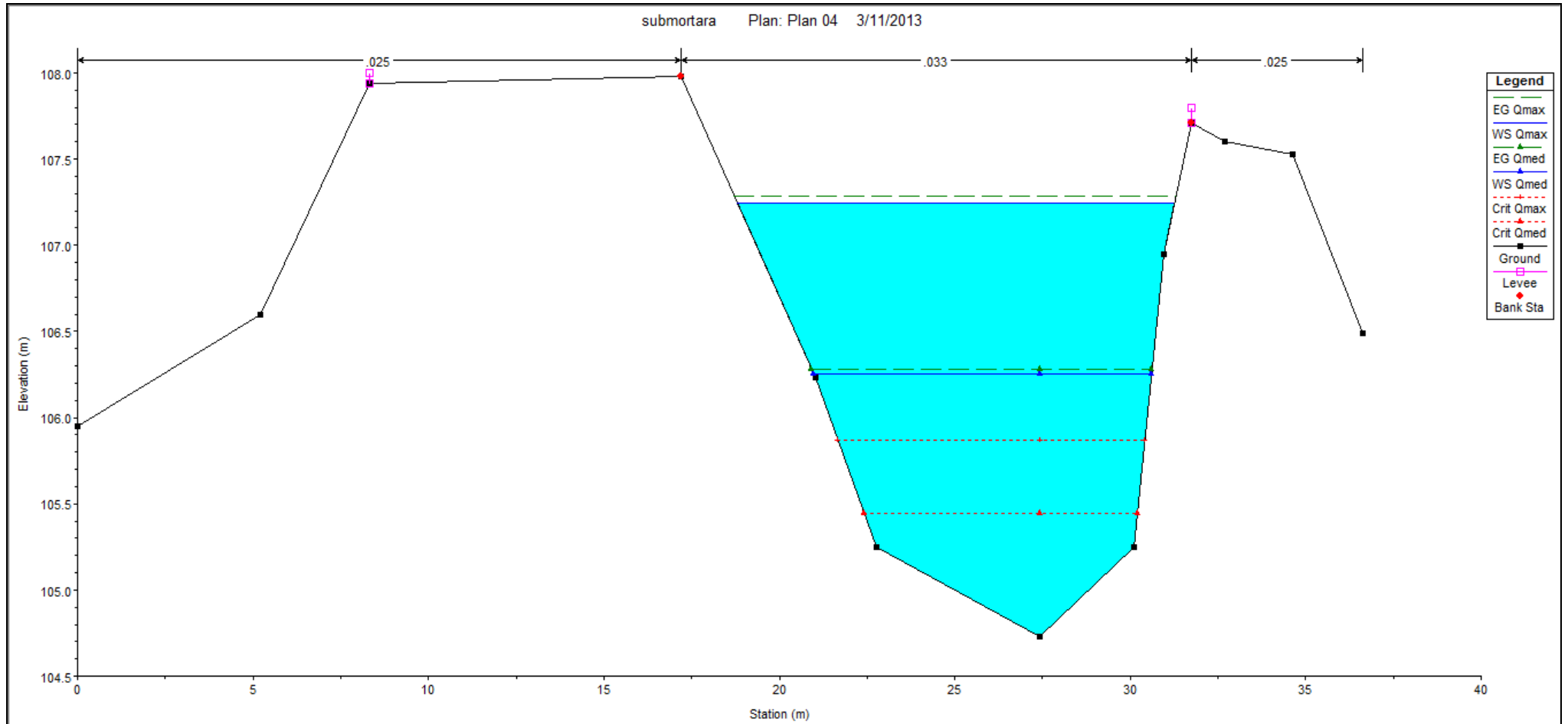


Figura 3.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-179	Foglio 10 di 30			-		

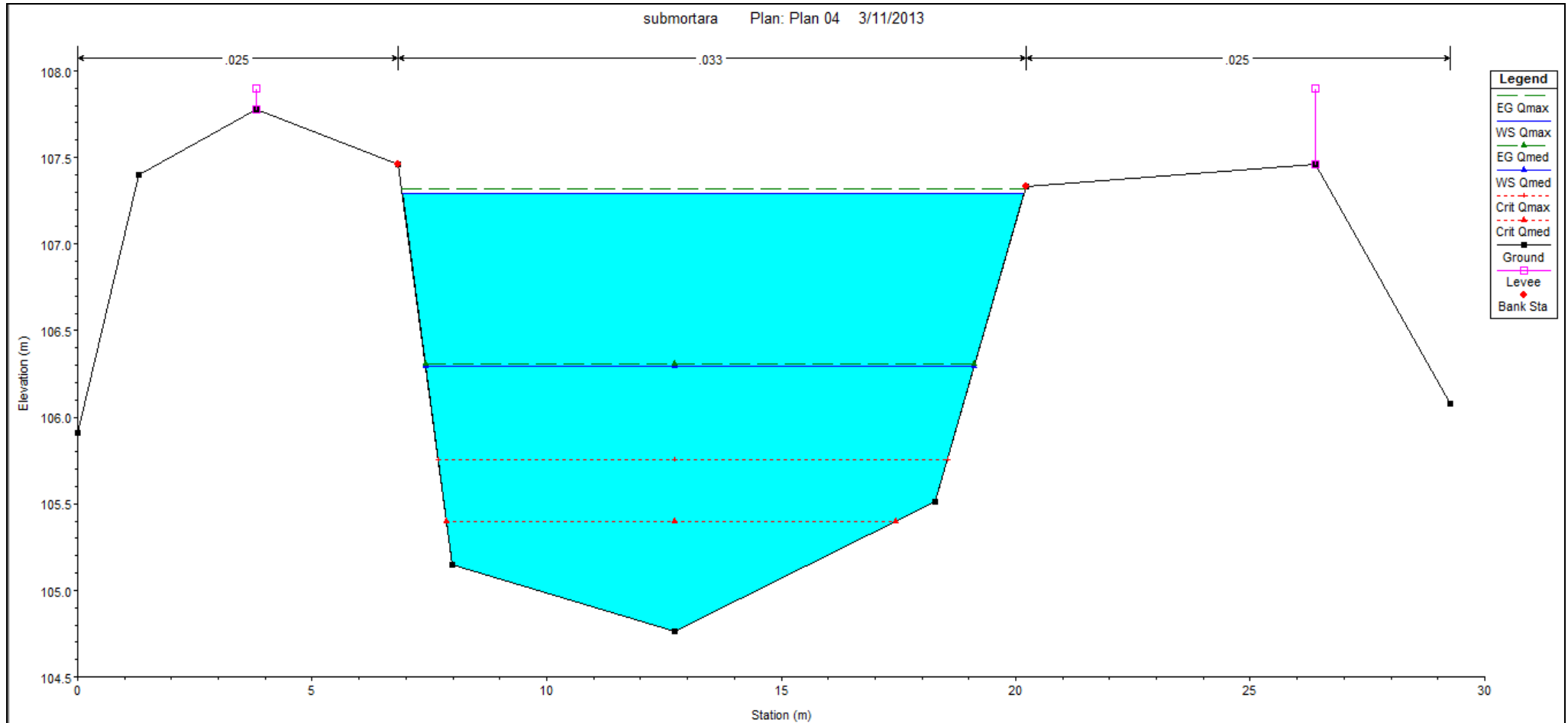


Figura 3.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-179	Foglio 11 di 30			-		

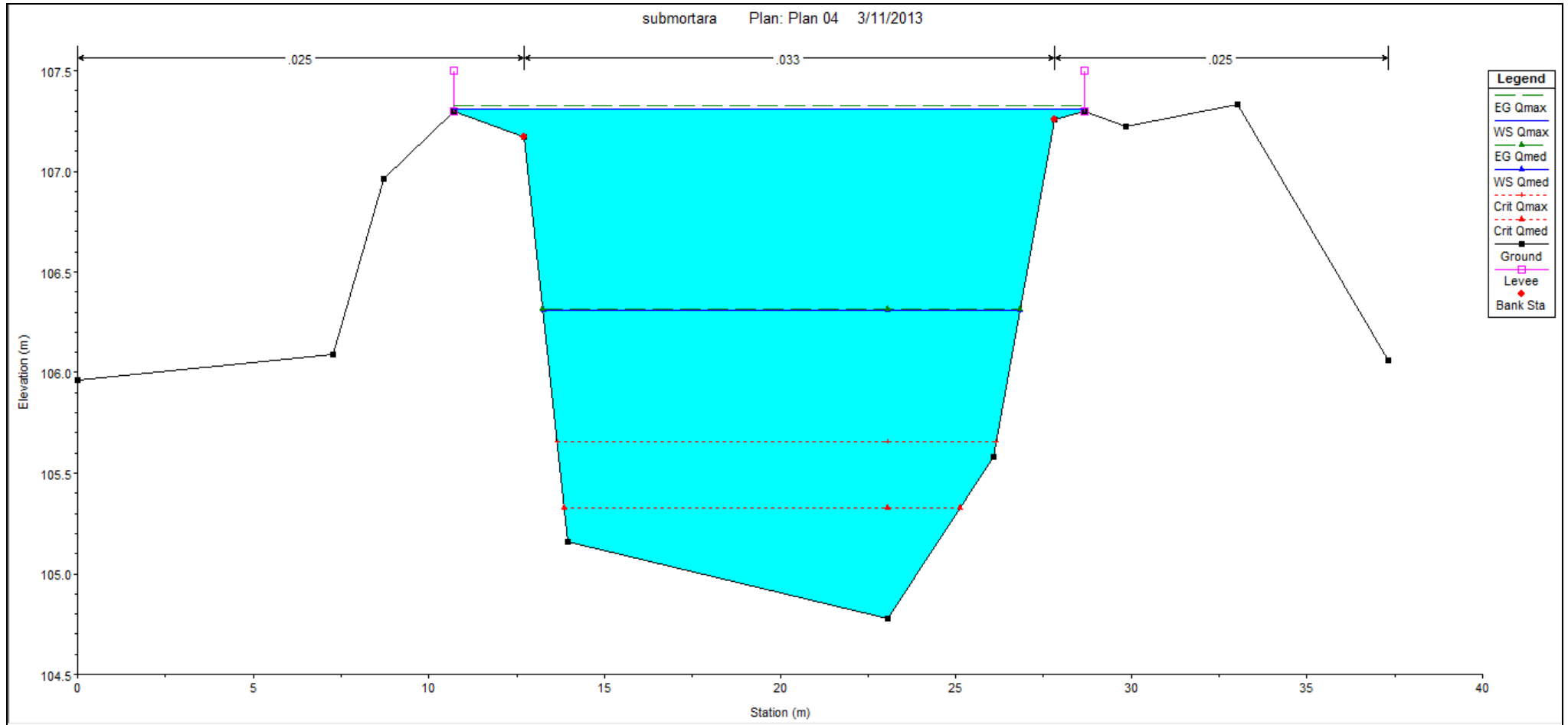


Figura 3.3: sezione trasversale a monte del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>												
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA ATTRAVERSAMENTO SUBDIRAMATORE MORTARA</b>												
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00					N°Doc. Cliente:				
J01811-PPL-RE-004-179		Foglio 12 di 30							-			

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ tot [N/mq]
30	19	104.78	107.31	105.65	107.33	0.00019	0.62	30.83	17.93	0.14	1.55	3.36
	7	104.78	106.31	105.33	106.32	0.000175	0.43	16.25	13.58	0.13	1.11	1.91
20	19	104.76	107.29	105.76	107.32	0.000293	0.73	25.86	13.24	0.17	1.68	4.85
	7	104.76	106.29	105.4	106.31	0.000276	0.52	13.44	11.7	0.16	1.05	2.85
10	19	104.73	107.25	105.87	107.29	0.0005	0.89	21.36	12.47	0.22	1.5	7.38
	7	104.73	106.25	105.44	106.28	0.0005	0.67	10.43	9.64	0.21	0.98	4.83

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 13 di 30				

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata massima sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovuta principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2 e 5.

Per quanto riguarda il punto 2 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, trattandosi di un corso d'acqua artificiale, la pendenza di fondo è mantenuta fissa intorno a quella di progetto da una serie di opere di stabilizzazione trasversale quali traverse, conche, manufatti di salto.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla presenza di tratti di fondo rivestito che potrebbero innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 14 di 30				

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>2</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 0,75 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1,50 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 0,75 * 1,50 = 1,12 \text{ m}$$

### Caso 3:

L'attraversamento in progetto cade all'inizio di una curva del canale, risultano quindi applicabili le formule empiriche per la determinazione dell'erosione in curva.

Va evidenziato che trattandosi di formule sperimentali, la loro validità è fortemente legata alle condizioni al contorno utilizzate per la loro determinazione, pertanto si è proceduto utilizzando due delle principali espressioni reperibili in letteratura, in modo da poter confrontare i risultati, e si sono adottati opportuni coefficienti di sicurezza.

Secondo la relazione di Seminara e Tubino (1989), nell'ipotesi di trasporto al fondo dominante, sedimenti omogenei e raggio di curvatura costante, la profondità massima di scavo si può ricavare dall'espressione:

$$\eta_{\max} = Yd_o \frac{b_f}{4r_c}$$

Dove:

- $b_f$  è la larghezza del fondo alveo;
- $Y$  il tirante idrico della sezione all'inizio della curva
- $r_c$  è il raggio di curvatura

---

<sup>2</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con H= carico totale

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 15 di 30					-

- $d_0$  è un coefficiente che si ricava da tabelle sperimentali (Vedi Annesso 2) in funzione del numero di Shields  $\theta$  e del rapporto  $D/Y$ , con  $D$  diametro rappresentativo del sedimento.

Un'altra espressione per la determinazione della massima profondità di posa è fornita da Galay et al. (1987) che per alvei con angolo interno intorno a  $100^\circ$  pone:

$$h_g = h_{med} \left( 0,9 + 3,7 \frac{b_f}{r_c} \right)$$

Mentre per angoli al centro inferiori a  $60^\circ$  risulta :

$$h_g = h_{med} \left( 1,2 + \frac{B}{R} \right)$$

Dove, oltre ai simboli già visti in precedenza

- $h_g$  è il tirante idraulico in corrispondenza del gorgo;
- $h_{med}$  è la profondità media nella sezione di attacco della curva (calcolata come rapporto tra l'area e la larghezza del pelo libero);

dall'applicazione delle formule suddette si sono ottenuti i risultati riportati nella seguente tabella (in cui il significato e le unità di misura dei vari simboli utilizzato è indicato in precedenza):

<b>bf</b>	10,30
<b>rc</b>	161
<b>Y</b>	2,53
<b>h<sub>med</sub></b>	1,95
<b>D</b>	0,005
<b>do</b>	12,50
<b>μ</b>	0,50
<b>hg</b>	2,22
<b>Med.</b>	1,52

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di curve

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 16 di 30				

Data la notevole diversità dei risultati ottenuti dalle due formule, si ritiene opportuno, a favore di sicurezza, adottare il maggiore dei due con un coefficiente di sicurezza pari ad 1,3 si ottiene:

$$S_{\max \text{ curva}} = 2,22 * 1,30 = 2,88 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>3</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 17 di 30					-

<b>bf</b>	10,30
<b>Y</b>	2,53
<b>D</b>	0,005
<b><math>\beta</math></b>	2,03
<b><math>\beta_c</math></b>	12,50
<b>H</b>	<b>No</b>
<b><math>\mu_{max}</math></b>	<b>No</b>

Tabella 4: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 3, erosione dovuta alla presenza di curve, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare **non inferiore a circa 2,88 m**, poiché il progetto prevede di posare il tubo camicia con la generatrice superiore ad **una profondità di m. 3,00** dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

---

<sup>3</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 18 di 30				

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo inciso.

Nel presente paragrafo si intende verificare che la realizzazione dell'opera in progetto non crei le condizioni per un possibile innesco di fenomeni di sifonamento.

Per l'esecuzione di tali tipi di verifiche esistono vari metodi, che spaziano da metodologie di tipo empirico o semi-empirico, a modelli analitici o modellazioni numeriche agli elementi finiti. L'attendibilità dei risultati ottenuti è tuttavia dipendente non solo dall'accuratezza del modello utilizzato ma anche dalla conoscenza delle caratteristiche di permeabilità dei vari terreni attraversati (funzione delle caratteristiche litologiche, del grado di addensamento, del comportamento anisotropo, ecc), valori non sempre desumibili correttamente da prove di laboratorio e per la cui conoscenza è necessaria una approfondita campagna geognostica (il cui costo non sempre è giustificato dalle finalità che ci si vuole prefiggere). Nel caso in esame, alla luce dei dati disponibili e delle condizioni esecutive previste, si ritiene sufficientemente cautelativo e maggiormente rispondente alle finalità del presente studio l'adozione di metodologie semplificate.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 19 di 30				

Si procede, a favore di sicurezza, all'esecuzione della verifica con due differenti metodi di tipo semplificato:

1. verifica del gradiente critico
2. verifica del percorso di filtrazione equivalente

### 6.1 Verifica del gradiente critico

Per l'esecuzione di tale verifica si ipotizza, a favore di sicurezza, che il foro di trivellazione costituisca una via di flusso preferenziale<sup>4</sup>, ovvero quella caratterizzata dalle perdite di carico minime, ignorando la presenza di eventuali altre vie di filtrazione esistenti anche più brevi.

Dovrà pertanto risultare che:

$$\frac{i_{cr}}{i} \geq F_s$$

La verifica viene condotta rispetto al piano campagna al piede dell'arginatura di sinistra, nell'ipotesi che il canale sia pieno al massimo livello (il dislivello rispetto al piano campagna risulta quindi  $\Delta h_{max} = 1,55$  m).

Dove:

- $i = \Delta h / L_{1-2-3}$  è il gradiente idraulico effettivo (ove la lunghezza è calcolata come da figura 3)
- $i_{cr} = \gamma' / \gamma_w$  è il gradiente idraulico critico per il terreno in esame<sup>5</sup>
- $F_s$  è il fattore di sicurezza

Nel caso in esame si assumono pertanto i valori della seguente tabella:

<sup>4</sup> Alla luce della tecnica di perforazione adottata, si tratta di un'ipotesi molto lontana dalla realtà dei fatti ma comunque a favore di sicurezza;

<sup>5</sup> Per i terreni presenti in sito, come risulta dai sondaggi eseguiti, si può assumere un peso dell'unità di volume compreso tra 1500 e 2300 kg/mc a seconda dei casi. Nella valutazione si assume quindi a favore di sicurezza pari all'80% del peso del terreno immerso di valore inferiore.

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 20 di 30					-

$\Delta h$ [m]	1,55
$L_{1-2-3}$ [m]	14,09
$\gamma_t$ [kg/mc]	400
$\gamma_w$ [kg/mc]	1000
$F_s$	$1,5^6$
$i_{cr} / i$	3,63

Tabella 6: verifica del gradiente critico

Essendo  $i_{cr} / i > F_s$  la verifica è soddisfatta.

## 6.2 Verifica del percorso di filtrazione equivalente

Per l'esecuzione di tale verifica occorre confrontare la lunghezza di filtrazione naturale presente nell'arginatura ( $L$ ) con il nuovo ipotetico percorso di filtrazione che si viene a creare con la realizzazione dell'attraversamento ( $L_t$ ), ipotizzando a titolo cautelativo che la linea di trivellazione possa costituire una via di filtrazione preferenziale.

Si impone pertanto che vengano verificate le due seguenti relazioni:

$$L_t = L_1 + L_2 / 3 + L_3 \geq f_s \times L$$

e

$$L_t \geq 0,10 \times L$$

Dove le singole lunghezze che concorrono a formare  $L_t$  sono riportate nella figura di pagina seguente.

In particolare, in base a studi condotti da Bligh e Lane, nel calcolo di  $L_t$  le lunghezze di filtrazione in orizzontale (o con inclinazione comunque inferiore a  $45^\circ$ ) vengono inserite nel

---

6 Avendo assunto una serie di ipotesi cautelative quali la presenza di un livello corrispondente al massimo riempimento delle sponde durante le operazioni di perforazione, la linea di scavo come via preferenziale di filtrazione trascurando percorsi più brevi, il peso efficace del terreno immerso pari a 400 kg/mc, tale coefficiente di sicurezza risulta sicuramente cautelativo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.: 00					N° Doc. Cliente: -
		Foglio 21	di 30			

conteggio ridotte ad un terzo per renderle confrontabili a quelle verticali (la resistenza al moto nei tratti orizzontali è infatti molto inferiore a quella nei tratti verticali).

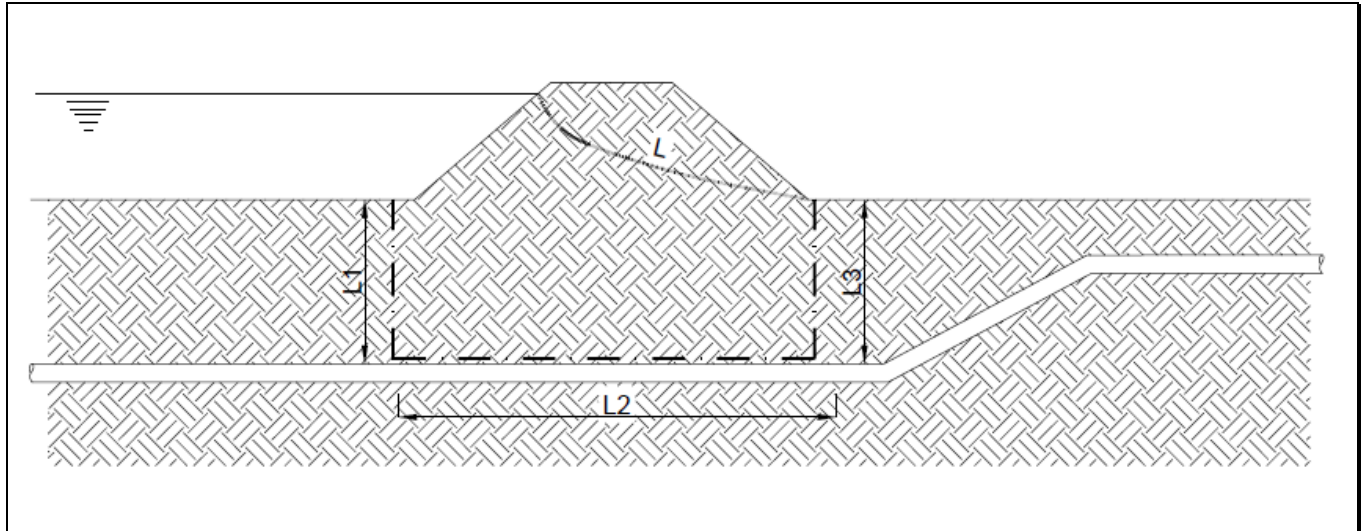


Figura 3: schema per il calcolo della lunghezza di filtrazione equivalente.

Assumendo le stesse ipotesi viste al punto precedente, il dislivello massimo risulta di 1,55 m.

Con riferimento all'elaborato grafico di progetto si assumono pertanto i seguenti valori:

L1 [m]	3,00
L2 [m]	6,94
L3 [m]	4,15
L [m]	7,01
$L_t > 1,2L^7$	Ok
$0,1xL$	0,7

Tabella 5: verifica del percorso equivalente

Essendo sempre  $L1 > 0,1xL$  e  $L_t > 1,2xL$  la verifica è ampiamente soddisfatta.

<sup>7</sup> Alla luce delle ipotesi cautelative assunte per la presente verifica si ritiene di adottare un coefficiente di sicurezza pari a 1,2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>							
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 22 di 30					-	

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Canale Mortara che, si ricorda, verrà eseguito la tecnica spingitubo tramite infissione di un tubo camicia in acciaio 1600 mm rivestito in polietilene, ad una profondità rispetto al punto più depresso del fondo alveo di m. 3,00.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente con un coefficiente di sicurezza di poco superiore a 1,50;
- che la tecnologia usata per realizzare l'attraversamento e la sua geometria consentono di escludere rischi di sifonamento sia a breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 23 di 30				

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 24 di 30				

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 25 di 30					-

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### Calcolo del profilo di moto permanente

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

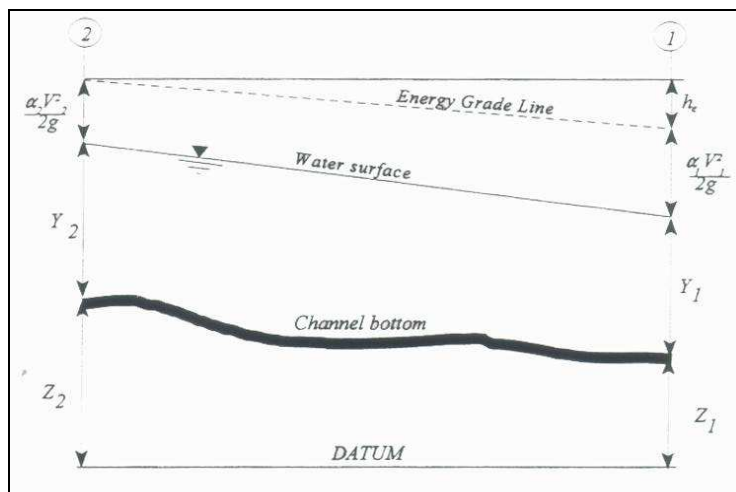


Fig.1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.:	00				N°Doc. Cliente: -
		Foglio 26 di 30				

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il canale di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 27 di 30				

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

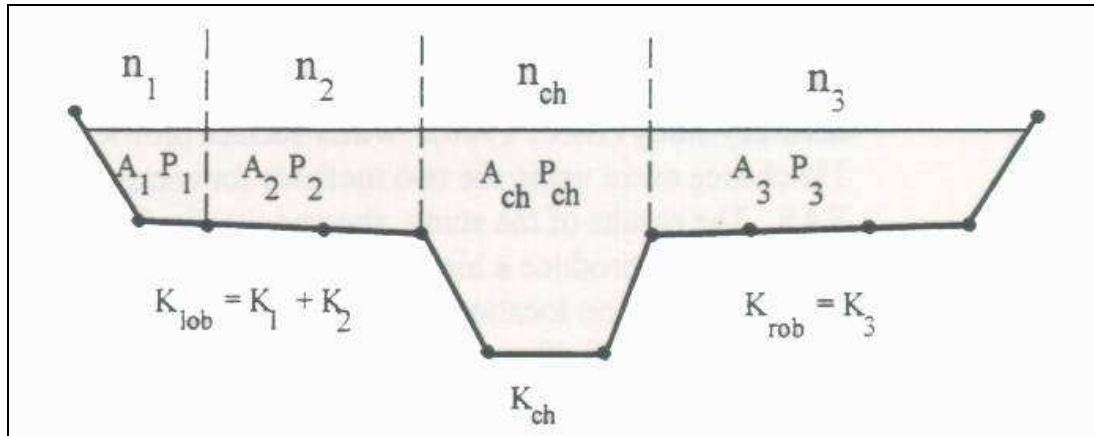


Fig.2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0179	Rev.: 00					N°Doc. Cliente: -
		Foglio 28	di 30			

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

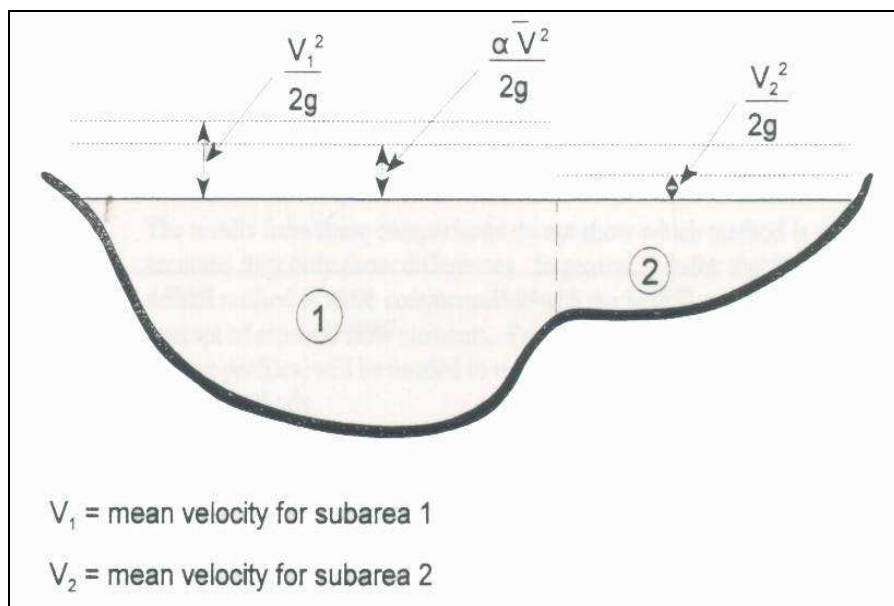


Fig.3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 29 di 30					-

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $D_0$  E  $\beta_c$**

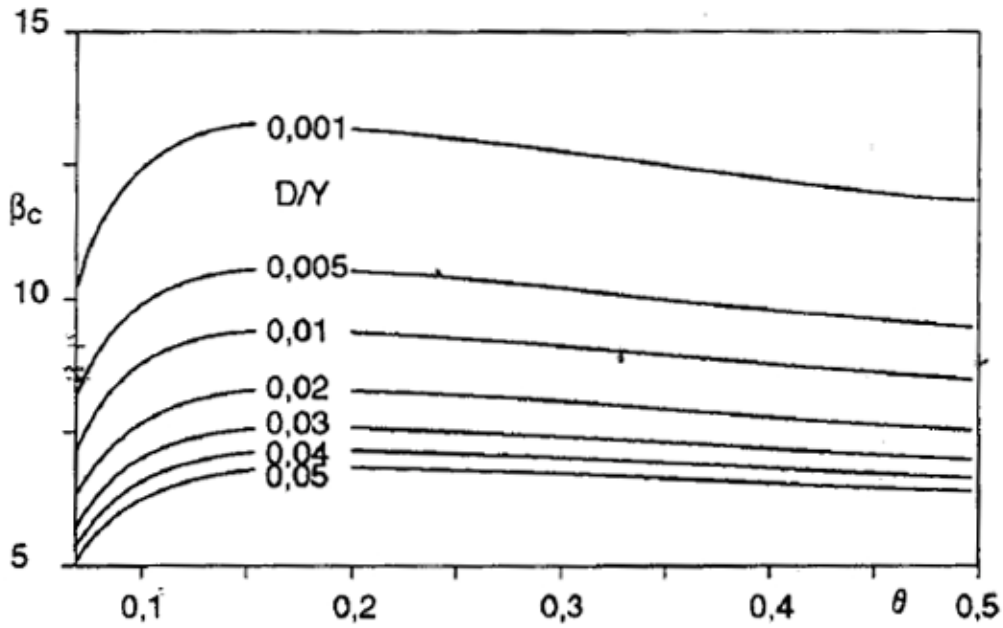


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^8$

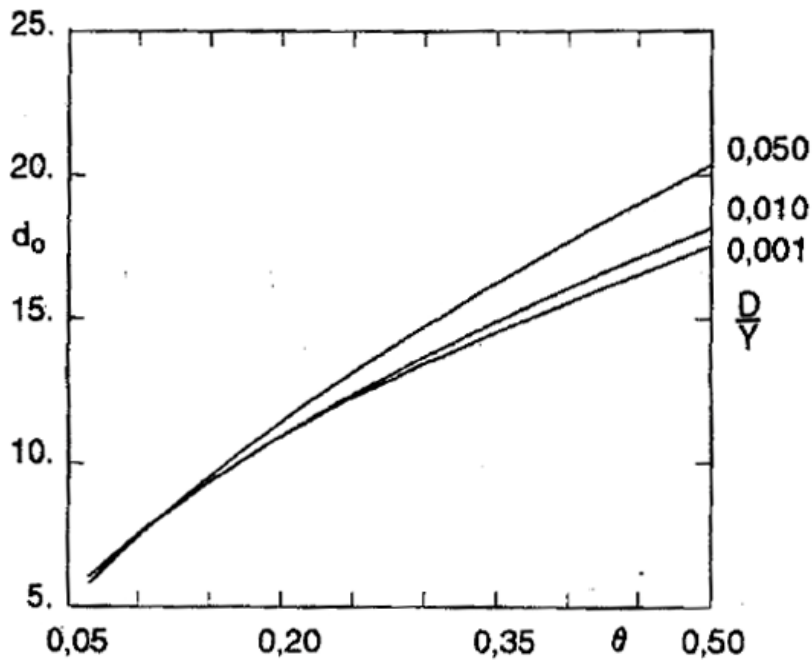


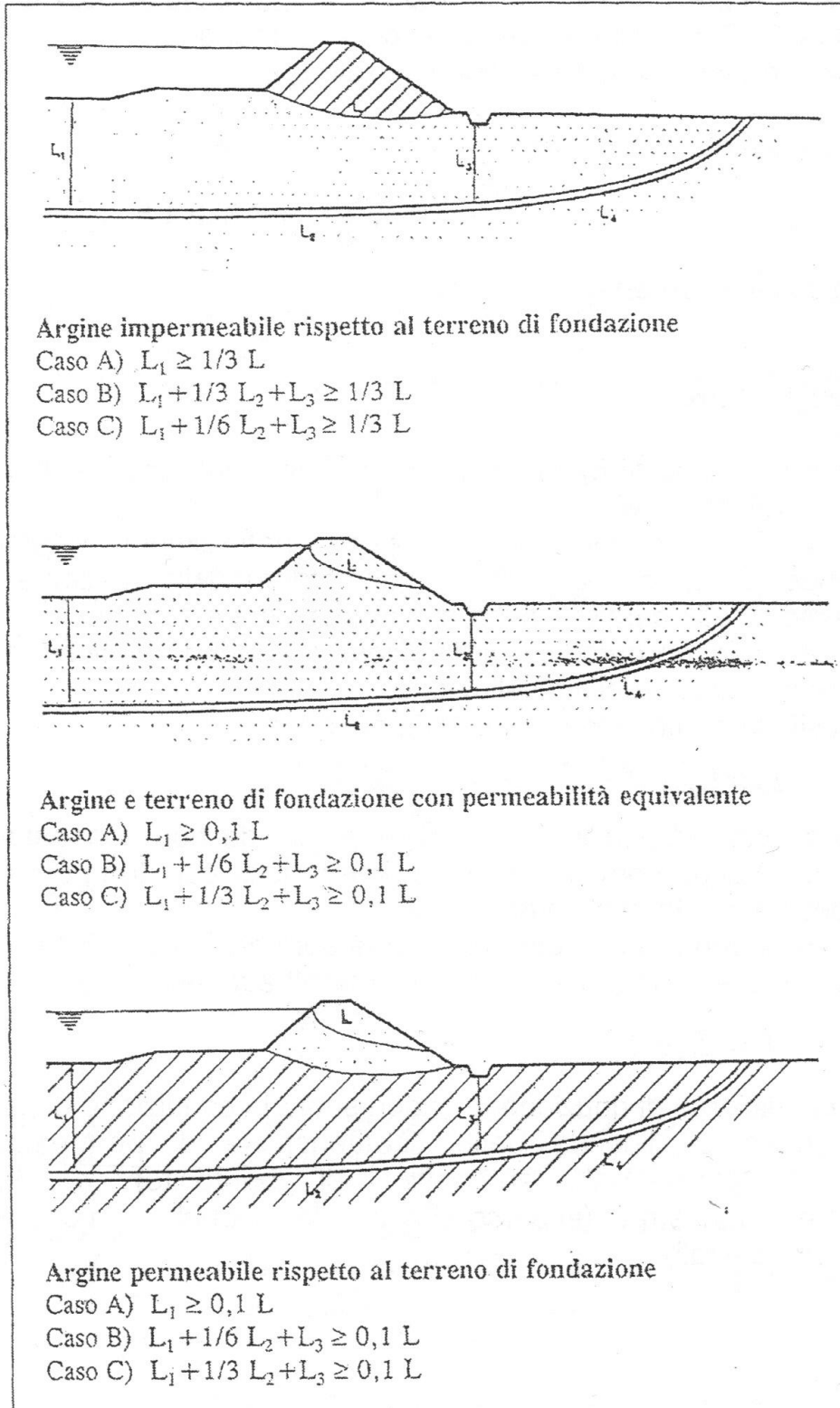
Tabella per la determinazione di  $d_0^9$

<sup>8</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna



<sup>9</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

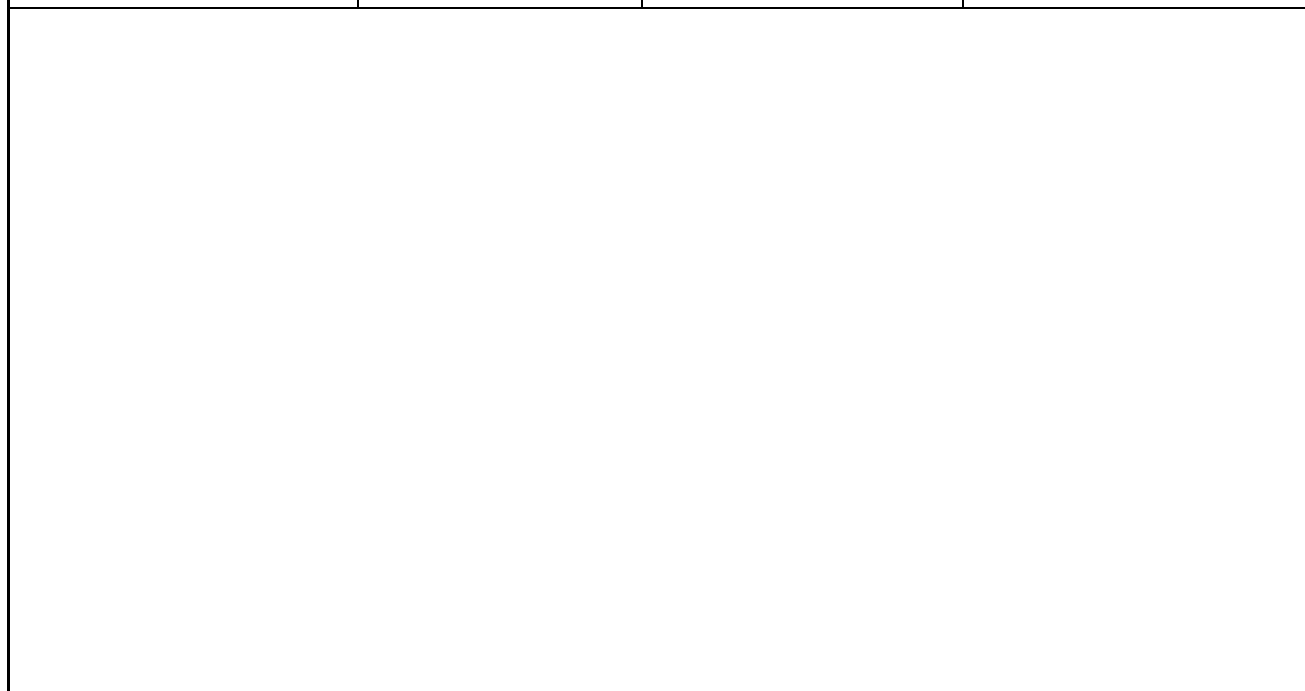
METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA SUBDIRAMATORE MORTARA						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0179	Foglio 30 di 30					-

### ANNESSO 3: SCHEMA PER LA VERIFICA DELLA LUNGHEZZA DI FILTRAZIONE EQUIVALENTE<sup>10</sup>



<sup>10</sup> Tratto da "Horizontal Boring", Blingh e Lane, Provincia di Zuild, Olanda, 1985

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA  DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Ciente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-004-0250	<b>Foglio</b> 1            di            27	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA**  
**FIUME TICINO**  
(compreso Canale del Pubbirolo, Fosso Pianta e Fosso dei Rubini)



00	12-04-13	EMMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
		Foglio		2	di	27	

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TICINO</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE</b>	<b>14</b>
5.1	Erosione al fondo	14
5.2	Definizione della profondità di posa	18
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO</b>	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>20</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS</b>	<b>21</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>D_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>27</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0250	Foglio			3	di	27	

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Fiume Ticino, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo fluviale, sia al fine di evitare opere provvisorie e di ripristino impegnative, sia in ragione del regime idrologico del fiume, caratterizzato da una portata non trascurabile anche nei mesi estivi, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con un microtunnel di diametro interno 2400 mm. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 100 m dall'alveo inciso del fiume; la profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge poco più di 11 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il microtunnel DN 2400 verrà intasata con malta bentonitica o cementizia; terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le buche di spinta e di arrivo verranno interrate, per cui ad opera finita l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con l'asta idraulica e con i relativi deflussi.

Con la medesima trivellazione vengono attraversati anche alcuni altri canali denominati Fosso dei Rubini, Canale del Pubbirolo, e Canale Pianta (quest'ultimo esistente solo come sedime demaniale) che altro non sono che vecchi rami del Ticino, ora disconnessi idraulicamente dall'alveo principale e interessati dai deflussi solo in caso di piena.

L'attraversamento del fiume è ubicato in una zona ove il corso d'acqua segna il confine tra le Province di Milano e Pavia, distinta in dettaglio al F. 12 del NCT del Comune di Besate (MI) ed ai F. 42 e 86 del NCT del Comune di Vigevano (PV).

Scopo e finalità del presente studio è verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito degli eventi di piena, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

Verrà verificata in tal modo anche la compatibilità delle opere con le previsioni del PAI.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0250	Foglio 4 di 27						

Per la determinazione della portata di progetto si è fatto riferimento alla “Direttiva sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica” ed in particolare alla tabella 45 riguardante il Ticino.

Dalla cartografia per la determinazione delle fasce fluviali, *Foglio 138, Sez. II – Gambolò, Ticino 04*, si evince in particolare che l’attraversamento in progetto ricade tra le sezioni 14 e 13.

La modellazione è stata eseguita con la portata corrispondente al tempo di ritorno  $T_r$  200, nell’ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l’ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all’annesso 1).

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo, quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell’opera nei confronti del rischio di sifonamento.

Per il reperimento dei dati necessari allo studio in oggetto si è fatto riferimento ai documenti degli strumenti di pianificazione vigenti quali:

- *Piano Stralcio dell’Autorità di bacino del Fiume Po;*
- *Cartografia allegata al PAI.*



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
	Foglio 5 di 27						

## 2 CARATTERISTICHE GENERALI

Il Ticino è il principale affluente del Po per volume d'acqua e, in assoluto, il secondo fiume italiano per portata d'acqua dopo quest'ultimo. Il Ticino misura complessivamente 248 km, dei quali 91 km percorsi a monte del lago Maggiore, 47 km percorsi nel Verbano e 110 km percorsi da Sesto Calende al Po. Il corso d'acqua è infatti tradizionalmente diviso in tre parti: la parte montana (Ticino Superiore), che scorre in territorio svizzero; la parte lacunale, che riguarda il Lago Maggiore e la parte pianeggiante (Ticino Inferiore), che vede il Ticino scorrere in Italia, nella tratta compresa tra Sesto Calende ed il Po. Il Ticino, grazie alla copiosità delle sue acque ha grande importanza per l'irrigazione ed è un'importante fonte di energia elettrica. Se infatti, fra gli affluenti del Po, occupa solo il 4° posto per lunghezza dopo Adda, Oglio e Tanaro, ed il 3° per superficie di bacino dopo Tanaro e Adda, è però di gran lunga quello più ricco d'acque in ogni stagione, sia come portata media alla foce (ben 350 m<sup>3</sup>/s), sia come portata minima (54 m<sup>3</sup>/s in estate), sia come portata massima (5.000 m<sup>3</sup>/s), al punto che il suo contributo idrico ed il suo regime sono assolutamente determinanti per il Po, rappresentandone da metà ad 1/5 della portata.

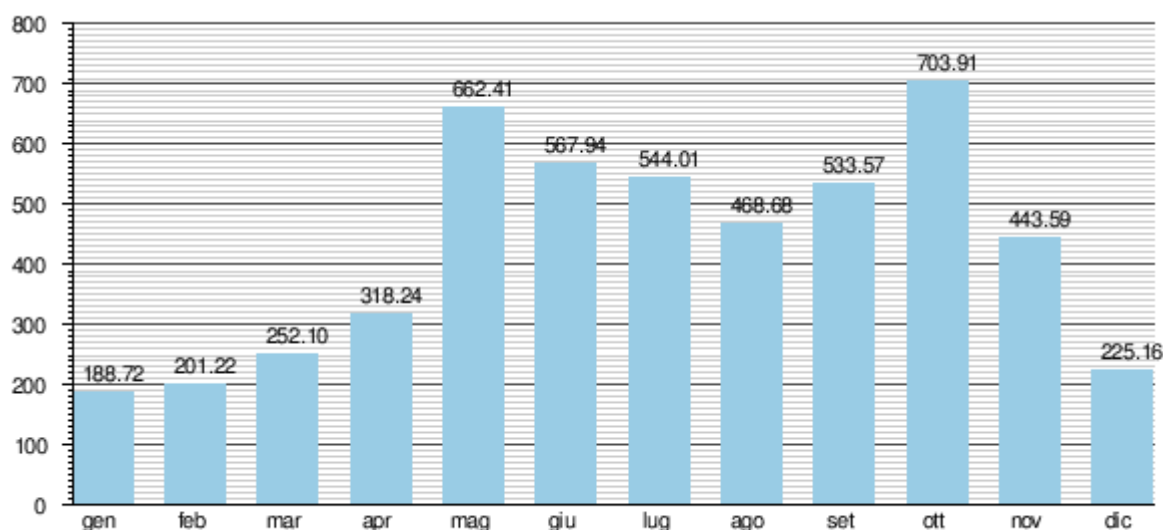


Figura 1: Portata media mensile (in m<sup>3</sup>) alla stazione idrometrica posta a monte della confluenza nel Po (da Piano Stralcio)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	6	di	27	

In territorio italiano esso alimenta vari canali artificiali sia per uso industriale che per uso irriguo. I principali affluenti del Ticino Inferiore (tratto a valle del lago Maggiore) sono: Strona, Arno (detto anche Arnetta), Canale Turbighetto, Canale del Latte, Canale Cavour, Roggia Cerana (denominazione del tratto finale del torrente Terdoppio Novarese), Canale Scolmatore di Nord Ovest (raccoglie le acque di piena di Seveso e Olona), Naviglio di Bereguardo, Naviglio Pavese e Navigliaccio, Canale Gravellone, Roggia Vernavola

Mentre i principali defluenti sono: Canale Regina Elena (origina il Diramatore Alto Novarese, che in seguito confluisce nel Canale Cavour), Canale Villoresi (la portata residua del canale si immette nel fiume Adda), Canale Industriale (cede la maggior parte della sua portata al Naviglio Grande, la portata residua riconfluisce nel Ticino come Canale Turbighetto), Naviglio Grande (sfocia nella Darsena di Porta Ticinese a Milano), Naviglio Langosco, Naviglio Sforzesco



Figura 2: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto (da Google Earth 2012)

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00					N°Doc. Cliente:
			Foglio	7	di	27	

### 3 STUDIO IDROLOGICO

Dalla tabella 45 della Direttiva citata in premessa si ricavano i seguenti dati di interesse:

Prog.	Sezione	Quota idrometrica	Q <sub>200</sub>
217.200	014	80,35	2.000
222.920	013	73,66	2.000

*Tabella 1 (tratta da tabella 45 della Direttiva )*

Poiché l'attraversamento in progetto è collocato circa in posizione intermedia tra le due sezioni suddette, nei paragrafi successivi si procederà alla modellazione idraulica del tratto di fiume di interesse considerando il seguente valore di portata:

$$Q_{Tr200} = 2.000 \text{ mc/sec}$$

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	8	di	27	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL FIUME TICINO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 110 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva citata che sono riassunti nella seguente tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 2 m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong$ 4 m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

*Tabella 2: valori caratteristici di scabrezza*

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>					
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00			N° Doc. Cliente:
	Foglio 9 di 27				

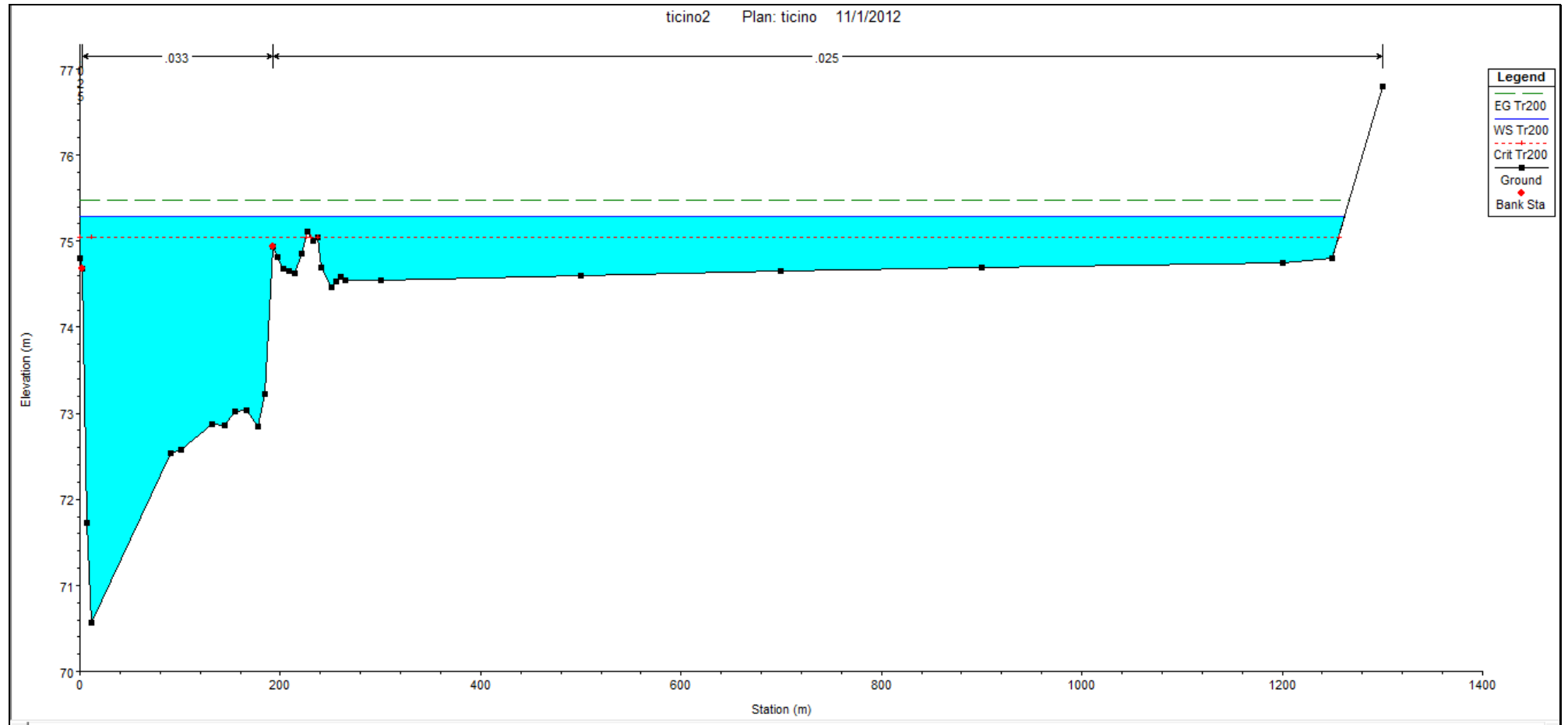
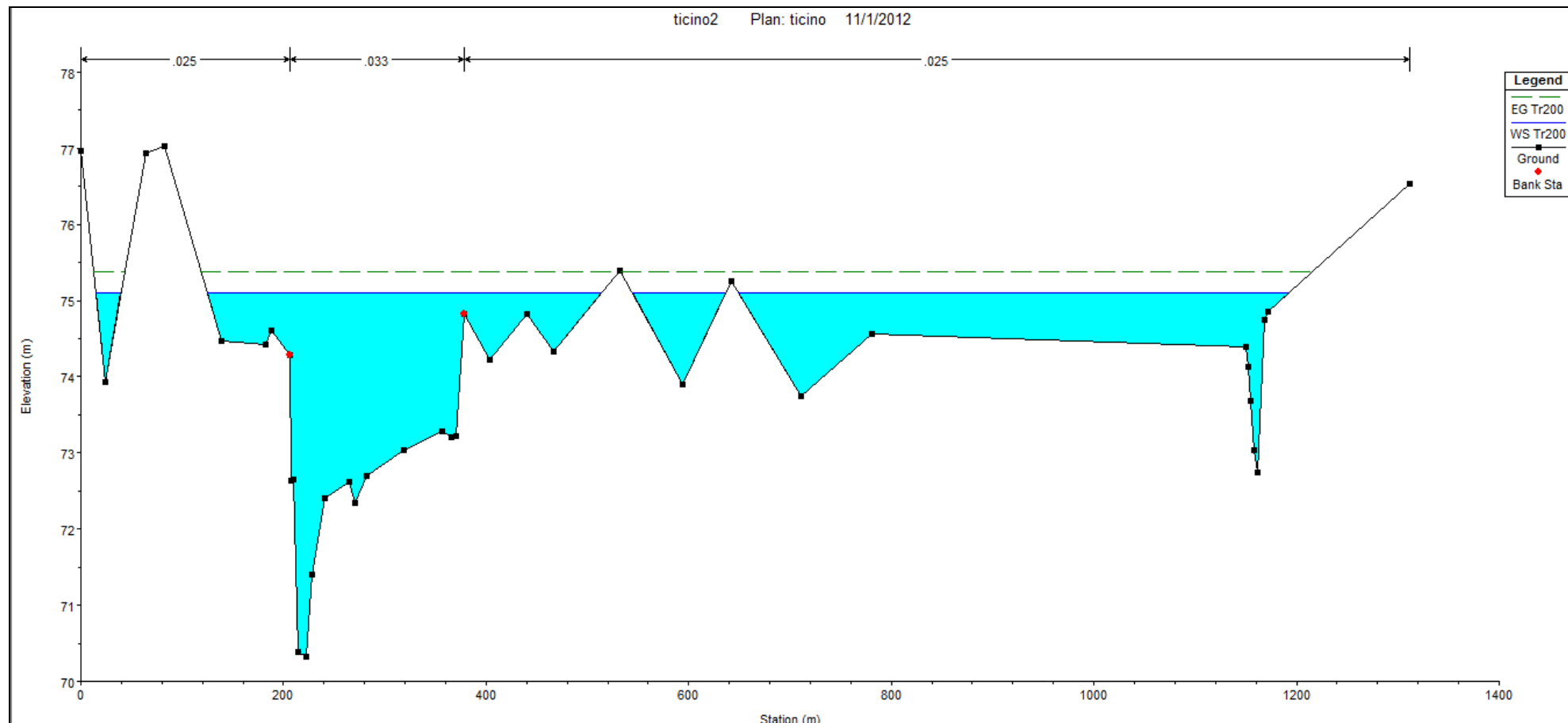


Figura 3.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 10 di 27					



*Figura 3.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo (si notino alle estremità di sinistra e destra della sezione le incisioni corrispondenti rispettivamente al Fosse dei Rubini ed al Canale del Pubbirolo, vecchi rami del Ticino ora disconnessi idraulicamente in tempo di magra, interessati dai deflussi solo in caso di piena)*

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>					
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>					
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00			N°Doc. Cliente:
	Foglio 11 di 27				

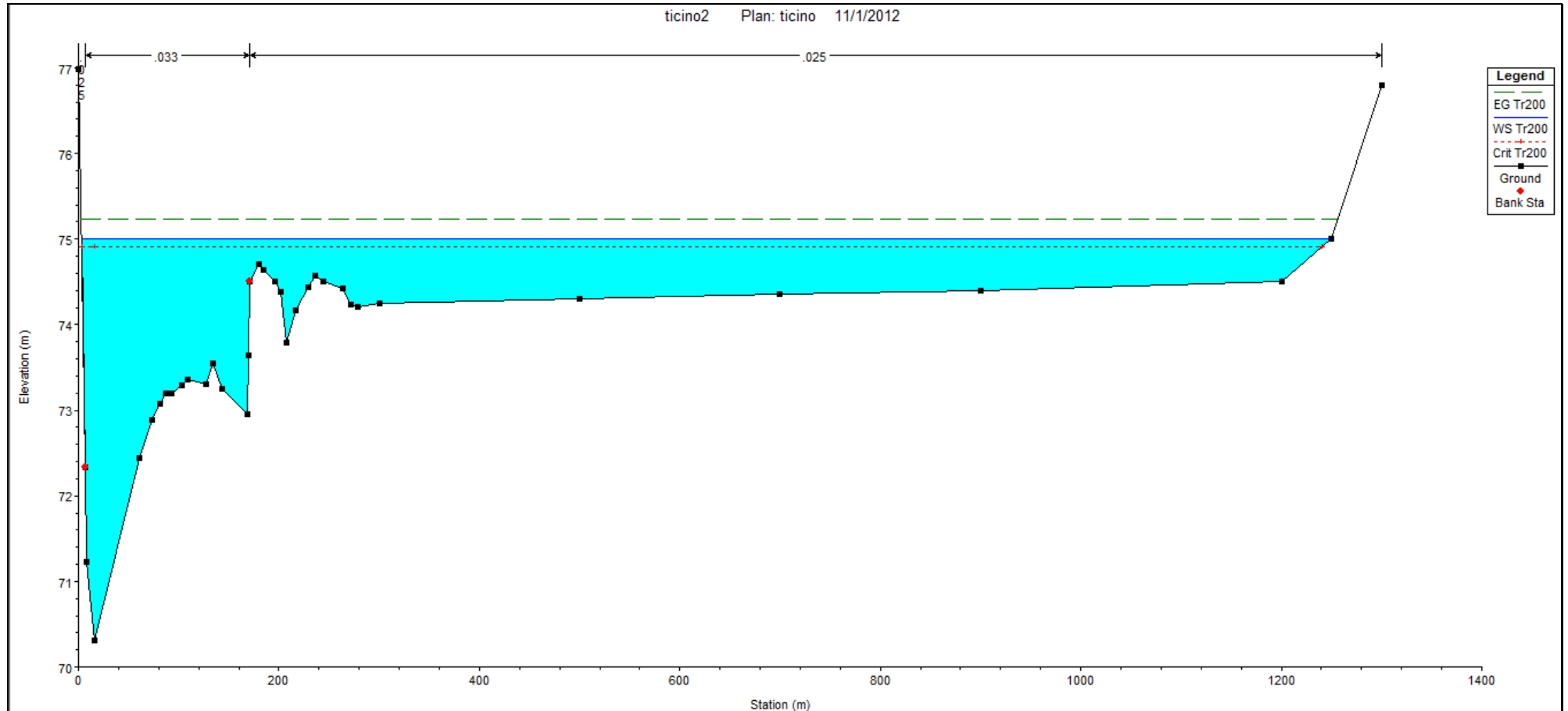


Figura 3.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0250		Foglio 12 di 27					

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]	$\tau$ tot [N/mq]
30	2000	70.56	75.31	75.05	75.5	0.001262	2.23	1259.99	1262.87	0.41	1	36.86	12.33
20	2000	70.33	75.1		75.38	0.002524	2.76	980.36	1050.51	0.56	0.93	60.4	23.05
10	2000	70.31	75	74.91	75.24	0.002304	2.63	1074.72	1247.15	0.54	0.86	55.02	19.44

Tabella 3: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	13	di	27	

E' opportuno evidenziare che, confrontando i risultati della tabella sopra riportata con quelli desunti dal Piano Stralcio dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, sintetizzati in Tabella 1, i livelli idrometrici previsti dal Pai nel tratto interessato dall'attraversamento sono sensibilmente superiori a quelli ottenuti dalla presente modellazione.

Tale diversità può essere collegata da un lato al diverso tipo di modello utilizzato (monodimensionale nel ns. caso, bidimensionale nel caso del PAI), dall'altro al fatto che l'estensione del rilievo disponibile nel caso in esame, limitato alla zona di possibile interferenza delle opere in progetto con l'alveo fluviale, non consente di valutare possibili effetti di rigurgito dovuti ad anse, restringimenti o ostacoli che possono essere presenti più a valle. Allo stesso modo non si può escludere che la differenza riscontrata sia collegabile al fatto che il rilievo di dettaglio, eseguito a livello locale a corredo del progetto, consenta una migliore rappresentazione dell'andamento d'alveo e delle zone di golena in tale tratto e, conseguentemente, una più precisa definizione dei livelli idrici in caso di piena.

Preme sottolineare tuttavia che tale non perfetta rispondenza dei livelli idrici non inficia i risultati delle calcolazioni di cui ai paragrafi successivi e questo sia in ragione dei coefficienti di sicurezza assunti che, soprattutto, del fatto che in generale un aumento del livello idrometrico (e conseguentemente della larghezza del pelo libero e dell'area) a parità di portata non determina una sostanziale variazione dei valori calcolati o, in alcuni casi, ne produce una diminuzione.

Il calcolo eseguito è quindi a favore di sicurezza.

Nell'unico caso in cui, tra quelli analizzati, il risultato dipende dal solo livello idrico, come nel caso della verifica di cui al paragrafo 6.2, si è proceduto al calcolo con i due differenti livelli (Pai e modellazione locale).

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		14	di		27

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche dell'evento con tempo di ritorno  $Tr_{200}$  anni.

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2 e 5.

Per quanto riguarda il punto 2 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, il corso d'acqua presenta la tipica conformazione a meandri, tipica dei fiumi "maturi" con pendenze di fondo molto basse e, pertanto sostanzialmente in equilibrio.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla formazione di locali depositi di materiale più fine che, determinando un aumento locale della velocità a causa della minore scabrezza, potrebbe innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	27	

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica  $q = Q/(\Omega/yu)$ , per tr 200 anni, risulta:

$$S_{\max \text{ Tr}200} = 1,88 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 2,00 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 1,88 * 2,00 = 3,76 \text{ m}$$

### Caso 3:

L'attraversamento in progetto cade circa a metà di un'ansa del fiume, risultano quindi applicabili le formule empiriche per la determinazione dell'erosione in curva.

Va evidenziato che trattandosi di formule sperimentali, la loro validità è fortemente legata alle condizioni al contorno utilizzate per la loro determinazione, pertanto si è proceduto utilizzando due delle principali espressioni reperibili in letteratura, in modo da poter confrontare i risultati, e si sono adottati opportuni coefficienti di sicurezza.

Secondo la relazione di Seminara e Tubino (1989), nell'ipotesi di trasporto al fondo dominante, sedimenti omogenei e raggio di curvatura costante, la profondità massima di scavo si può ricavare dall'espressione:

$$\eta_{\max} = Yd_o \frac{b_f}{4r_c}$$

Dove:

- $b_f$  è la larghezza del fondo alveo;
- $Y$  il tirante idrico della sezione all'inizio della curva
- $r_c$  è il raggio di curvatura

---

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con H= carico totale

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 16 di 27					

- $d_0$  è un coefficiente che si ricava da tabelle sperimentali (Vedi Annesso 2) in funzione del numero di Shields  $\theta$  e del rapporto  $D/Y$ , con  $D$  diametro rappresentativo del sedimento.

Un'altra espressione per la determinazione della massima profondità di posa è fornita da Galay et al. (1987) che per alvei in ghiaia ed angolo interno intorno a  $100^\circ$  e pone:

$$h_g = h_{med} \left( 0,9 + 3,7 \frac{b_f}{r_c} \right)$$

Mentre per angoli al centro inferiori a  $60^\circ$  risulta :

$$h_g = h_{med} \left( 1,2 + \frac{B}{R} \right)$$

Dove, oltre ai simboli già visti in precedenza

- $h_g$  è il tirante idraulico in corrispondenza del gorgo;
- $h_{med}$  è la profondità media nella sezione di attacco della curva (calcolata come rapporto tra l'area e la larghezza del pelo libero);

dall'applicazione delle formule suddette si sono ottenuti i risultati riportati nella seguente tabella (in cui il significato e le unità di misura dei vari simboli utilizzato è indicato in precedenza):

	<b>Tr 200</b>
<b>bf</b>	160
<b>rc</b>	900
<b>Y</b>	4,77
<b>h<sub>med</sub></b>	0,93
<b>D</b>	0,02
<b>do</b>	7,5
<b>μ</b>	1,59
<b>hg</b>	1,45
<b>Med.</b>	<b>1,52</b>

*Tabella 4: profondità di scavo prevedibile per la presenza di curve*

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
	Foglio 17 di 27					

Adottando un coefficiente di sicurezza pari ad 2,0 applicato al maggiore dei valori sopra calcolati si ottiene:

$$S_{\max \text{ curva}} = 1,59 * 2,00 = 3,18 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

---

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 18 di 27				

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

	<b>Tr 200</b>
<b>bf</b>	160
<b>Y</b>	4,77
<b>D</b>	0,02
<b>β</b>	16,77
<b>βc</b>	10
<b>H</b>	<b>2,06</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>1,17</b>

Tabella 5: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Adottando un coefficiente di sicurezza pari ad 1,5 applicato al valore sopra calcolate si ottiene:

$$S_{\max \text{ barre}} = 1,17 * 1,50 = 1,76 \text{ m}$$

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta al possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare non inferiore a circa 3,80 m; poiché la tecnica esecutiva ipotizzata prevede di raggiungere una profondità di 10,05 m dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

I risultati dei calcoli sopra riportati possono estendersi anche agli altri canali attraversati, in corrispondenza dei quali le profondità minime di posa sono le seguenti:

- Fosso dei Rubini: - 7,00 m. dal fondo alveo;
- Canale Pianta: -13,90 m. dal fondo alveo;
- Canale del Pubbirolo: - 8,70 m dal fondo alveo.

Anche in questi tre casi le profondità di posa sono abbondantemente a favore di sicurezza rispetto alle massime profondità di scavo prevedibili.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 19 di 27					

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è a sua volta funzione del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo parzialmente o totalmente inciso.

Tuttavia, nel caso in esame, il fiume scorre in un alveo inciso rispetto al piano campagna, per cui a regime, anche ipotizzando un livello idrico pari alla piena con Tr 200 anni, non ci sarà alcuna differenza di carico idraulico che possa innescare detto fenomeno.

La quota raggiunta dalla piena di progetto infatti, come risulta da tabella 3) è 75,10 m.s.m., mentre la minima quota del piano campagna è, in prossimità dell'attraversamento 76,28 m.s.m.

Anche imponendo, a titolo cautelativo, il livello di piena previsto dal PAI, superiore a quello calcolato con la modellazione monodimensionale e pari a 77,00 m.s.m.<sup>3</sup> non si presenterebbero le condizioni per l'innescarsi di eventuali fenomeni di sifonamento in quanto a quella quota corrisponde il completo allagamento di tutti i terreni circostanti, di conseguenza anche in tale ipotesi estrema non si avrebbe alcuna differenza di livello idrico.

La verifica del presente paragrafo risulta quindi superflua.

---

<sup>3</sup> Valore ottenuto come media dei tiranti idrici previsti dal PAI nella sezione a monte ed a valle di quella dell'attraversamento, come desumibili da tabella 3

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 20 di 27				

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Fiume Ticino che, si ricorda, verrà eseguito mediante la realizzazione di un microtunnel, con diametro interno 2400 mm e profondità di m. 10,00 rispetto al punto più depresso del fondo alveo.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle piene con Tr 200 anni con un coefficiente di sicurezza notevolmente superiore a 2,00;
- che la geometria del corso d'acqua nella zona dell'attraversamento, caratterizzata da un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, consente di escludere qualsiasi rischio di sifonamento sia nel breve che a lungo termine.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	21	di	27	

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	22	di	27	

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA).

Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 23	di 27			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

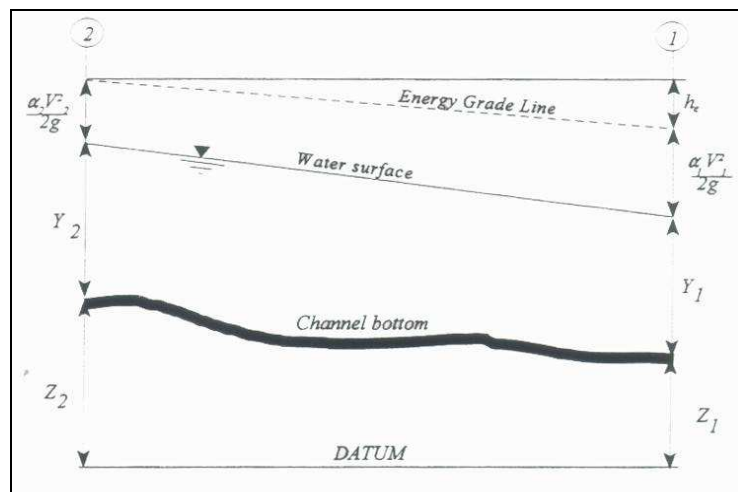


Fig.1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

$\alpha_1, \alpha_2$  : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 24 di 27					

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la golena di sinistra, il canale di magra e la golena di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 25	di	27		

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

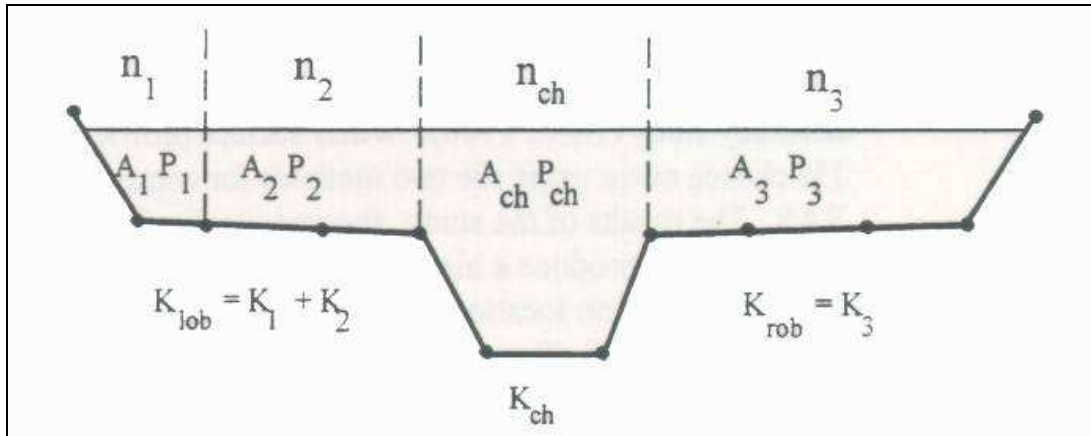


Fig. 2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0250	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 26 di 27					

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

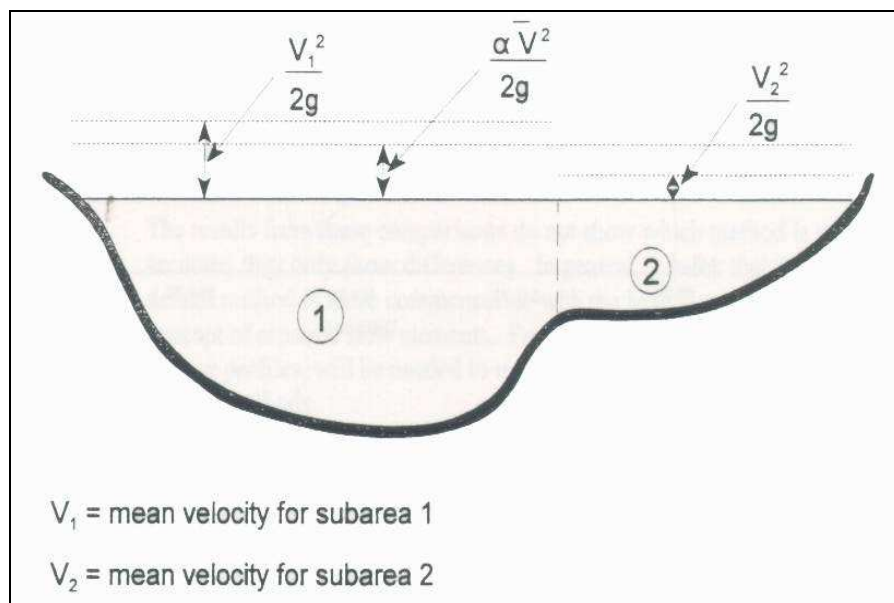


Fig. 3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA FIUME TICINO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0250	Foglio 27 di 27					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

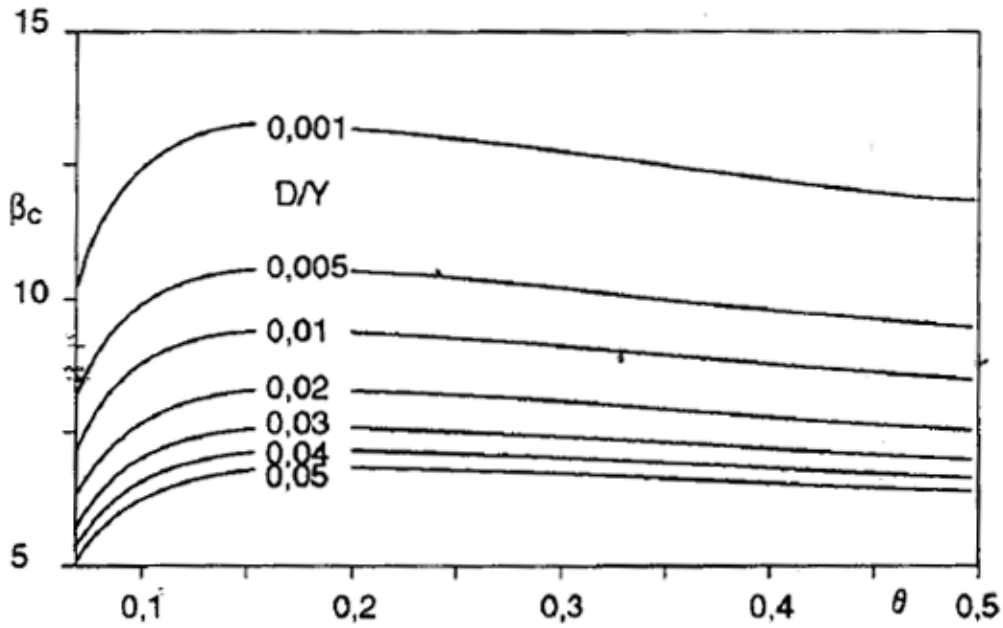


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^4$

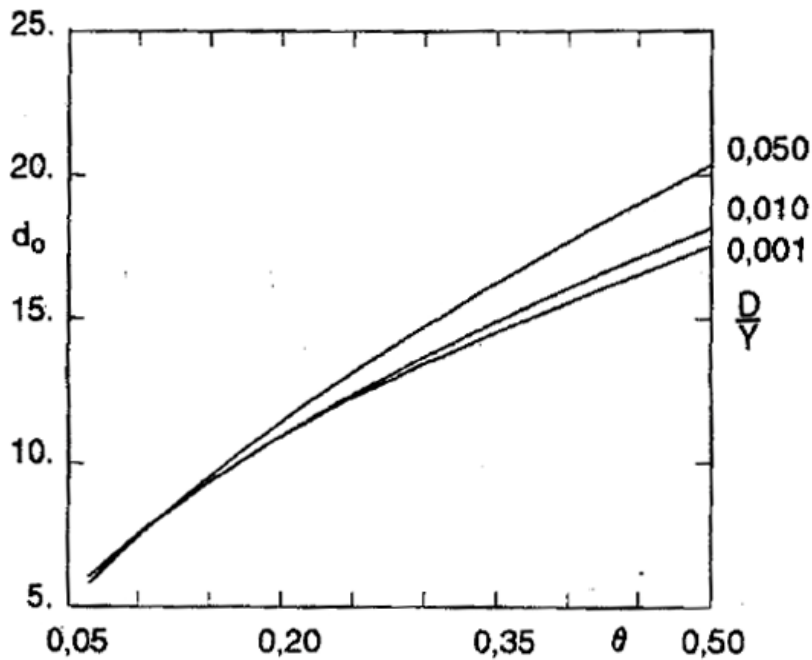


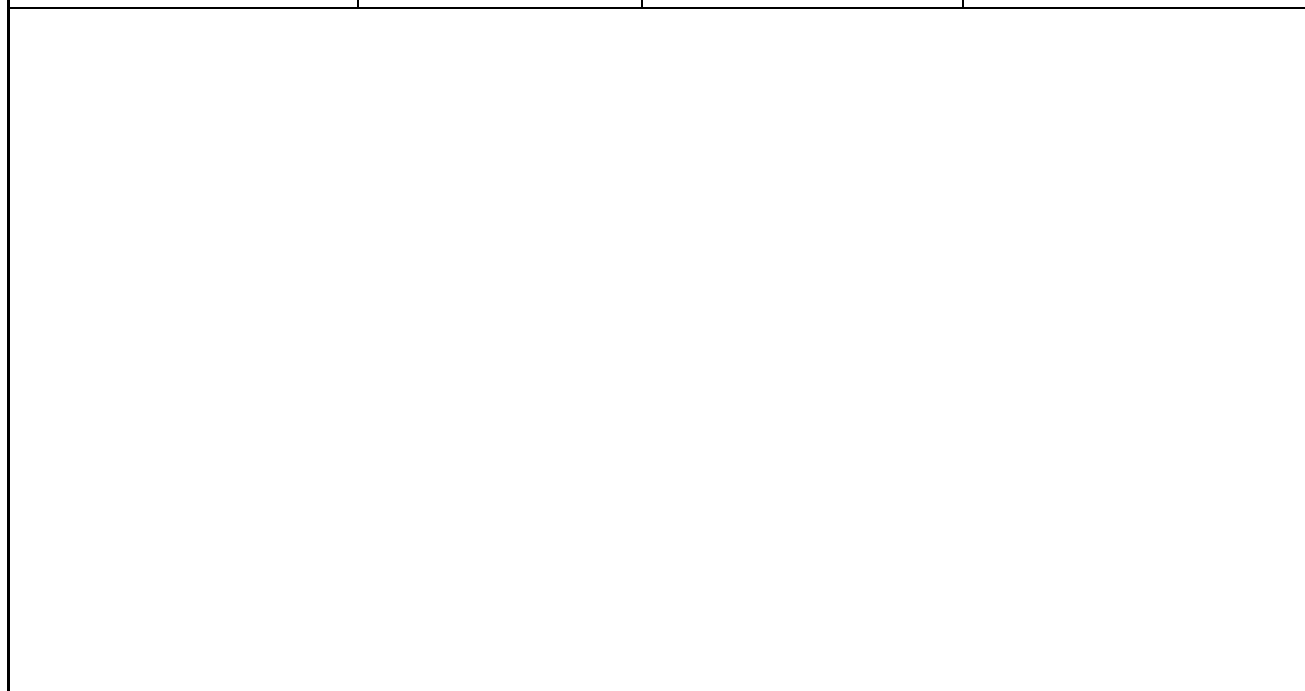


Tabella per la determinazione di  $d_0^5$

<sup>4</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>5</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<b>Contraente:</b> 	<b>Progetto:</b> <b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA</b> <b>DN 1400 (56") DP 75 bar</b>		<b>Cliente:</b>  <b>SNAM RETE GAS</b>
	<b>N° Contratto :</b> <b>N° Commessa :</b>		
<b>N° documento:</b> J01811-PPL-RE-004-0366	<b>Foglio</b> 1        di        25	<b>Data</b> 12-04-13	<b>N° documento Cliente:</b>



**RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA**  
**TORRENTE TERDOPPIO**



00	12-04-13	EMISSIONE	VANNI	FRASSINELLI	MONTONI
REV	DATA	TITOLO REVISIONE	PREPARATO	CONTROLLATO	APPROVATO



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00						N°Doc. Cliente:
		Foglio 2 di 25					

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CARATTERISTICHE GENERALI .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>STUDIO IDROLOGICO.....</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>STUDIO IDRAULICO DEL TORRENTE TERDOPPIO .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE .....</b>	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Erosione al fondo</b>	<b>14</b>
<b>5.2</b>	<b>Definizione della profondità di posa</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>VERIFICA AL SIFONAMENTO .....</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>18</b>
	<b>ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS .....</b>	<b>19</b>
	<b>ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI <math>d_0</math> E <math>\beta C</math></b>	<b>25</b>

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		3	di	25	

## 1 PREMESSA

La presente relazione è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche del Torrente Terdoppio, necessarie per la verifica della profondità di posa in subalveo della nuova condotta DN 1400 (56") DP 75 bar Cervignano-Mortara.

Per evitare di interferire con l'alveo fluviale, sia al fine di evitare opere provvisorie e di ripristino impegnative, sia in ragione del regime idrologico del torrente, caratterizzato da una portata non trascurabile anche nei mesi estivi, si è previsto di realizzare il nuovo attraversamento con microtunnel di diametro interno 2400 mm. Le buche di spinta e di arrivo sono state previste ad una distanza di oltre 100 m dall'alveo inciso del corso d'acqua; la profondità di posa, in corrispondenza del punto più depresso del fondo alveo, raggiunge poco più di 8,00 m. L'intercapedine tra la condotta di progetto DN 1400 ed il microtunnel DN 2400 verrà intasata con malta bentonitica o cementizia; terminate le operazioni di inserimento e collaudo della condotta, le buche di spinta e di arrivo verranno interrato, per cui ad opera finita, l'intervento in progetto sarà privo di qualsiasi tipo di interferenza con l'asta idraulica e con i relativi deflussi.

L'attraversamento del torrente è ubicato in una zona distinta in dettaglio ai F. 25 e 42 del NCT del Comune di Gambolò (PV).

Scopo e finalità del presente studio è pertanto verificare da un lato l'idoneità della profondità di posa adottata rispetto alle possibili dinamiche evolutive del fondo alveo o a possibili fenomeni di dissesto/erosione localizzati in corrispondenza del transito degli eventi di piena, dall'altro che le opere in progetto non determinino rischi di sifonamento.

Verrà verificata in tal modo anche la compatibilità delle opere con le previsioni del PAI.

La modellazione di cui ai paragrafi seguenti è stata eseguita nell'ipotesi di moto permanente, mediante elaboratore elettronico, con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras (per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1).

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		4	di	25	

Si è provveduto in tal modo alla determinazione delle grandezze caratteristiche del deflusso in alveo, quali altezza del tirante idrico, velocità della corrente, raggio idraulico, ecc.

I valori così calcolati sono stati poi utilizzati per le verifiche della profondità di posa della nuova condotta eseguite al par. 5.

Al paragrafo 6 sono invece riportate le verifiche di sicurezza dell'opera nei confronti del rischio di sifonamento.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		5	di		25

## **2 CARATTERISTICHE GENERALI**

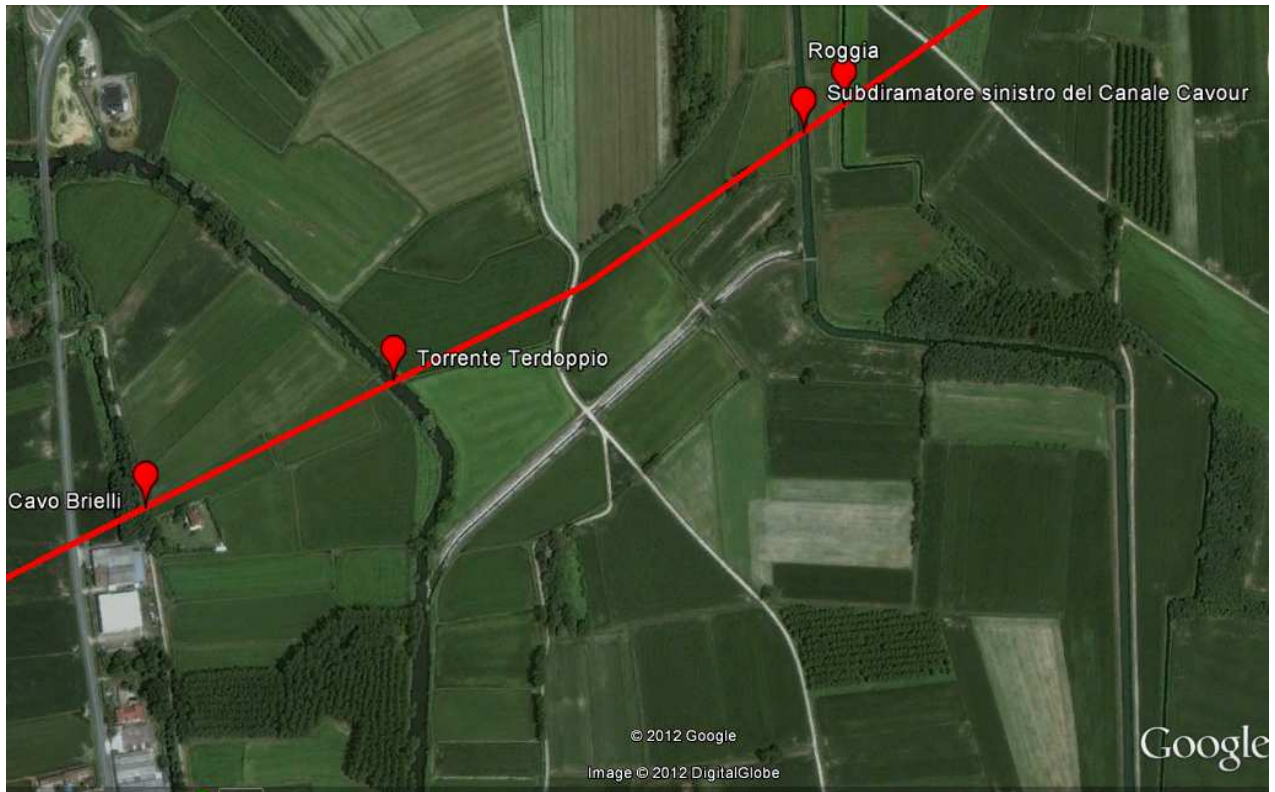
Il bacino del Torrente Terdoppio, che ha una superficie complessiva di circa 515 kmq, con caratteristiche sostanzialmente pianeggianti, nasce dal gruppo delle Prealpi compreso tra il Lago Maggiore ed il Lago d'Orta e scorre in direzione sud-sud/est attraverso il basso novarese e la Provincia di Pavia, confluendo nel Po presso Zinasco, per uno sviluppo complessivo di circa 86 km.

In realtà il corso del torrente è nettamente distinto in due tratte fisicamente disconnesse, rispettivamente il Terdoppio novarese, che confluisce in Ticino a valle di Cerano ed il Terdoppio lomellino che confluisce appunto in Po presso Zinasco. Tale divisione si è determinata in seguito alla realizzazione di uno scolmatore in Ticino in epoca medioevale, determinando la formazione di due bacini distinti con superfici presso ché uguali.

L'interesse del presente studio si concentra pertanto sul Terdoppio lomellino interessato dalle opere in progetto.

Il torrente, a valle del diversivo verso il Ticino, prende origine da alcuni scoli minori presenti nella porzione meridionale della provincia di Novara ed incrementa progressivamente la portata grazie all'apporto di risorgive, colatori e, soprattutto di scaricatori di piena di altri corsi d'acqua. Il comportamento idrologico di tale asta idraulica pertanto risulta solo parzialmente dipendente dagli eventi meteorologici che interessano il bacino idrografico drenato, in quanto connesso agli apporti dei vari scaricatori presenti lungo il suo corso, alcuni dei quali relativi oltretutto ad infrastrutture idrauliche esterne al bacino del Terdoppio stesso, quali ad esempio gli scaricatori del Naviglio Langosco, del canale Cavour (Subdiramatore Pavia), e di altri corsi d'acqua dei bacini del Ticino e della Dora Baltea.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366	Foglio 6 di 25					



*Figura 1: Foto area con localizzazione dell'attraversamento in progetto*

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		7	di		25

### **3 STUDIO IDROLOGICO**

Come accennato in premessa il regime idrologico del Torrente Terdoppio risulta fortemente artificializzato per effetto della presenza di numerose opere di derivazione irrigua e di scaricatori di piena di altri corpi idrici.

Probabilmente per tale motivo il tratto lomellino del Torrente Terdoppio non è stato interessato dagli studi idraulici connessi al PAI come invece è accaduto per il tratto novarese.

Pertanto, un'analisi idrologica tradizionale, basata sulla determinazione della portata di progetto, partendo dall'analisi statistica dei dati di pioggia raccolti da una o più stazioni pluviometriche ricadenti nel bacino di interesse, nonché dall'analisi delle caratteristiche del bacino stesso (uso ed impermeabilità dei suoli, tempo di corrivazione, ecc.), porterebbe ad ottenere valori che non rappresentano le effettive portate massime che possono interessare il tratto d'alveo di interesse, valore che invece risulta dalla sovrapposizione degli effetti tra le portate indotte dagli eventi meteorici incidenti sul bacino idrografico di interesse ed i contributi provenienti dalle varie reti interconnesse con quella in esame, dato quest'ultimo non facilmente ricostruibile.

D'altro canto non sono presenti lungo l'asta stazioni idrometriche dell'ex Servizio Idrografico che consentano di ricavare, sulla base dei livelli registrati e di una scala di deflusso impostata, le portate transitanti in alveo per assegnati tempi di ritorno.

Alla luce delle considerazioni sopra espresse, tenendo conto delle finalità del presente studio, che, come già descritto in premessa non prevede interferenze dirette con l'alveo del corso d'acqua e le sue pertinenze, si procederà alla determinazione del valore di portata da utilizzare per la definizione delle grandezze di interesse con un metodo di tipo speditivo ma sicuramente a favore di sicurezza.

In dettaglio si è ricavata, per tentativi, la massima portata transitabile nella sezione interessata dall'attraversamento, valore oltre il quale si ha l'esondazione dei terreni circostanti.

Di fatto tale valore è quello cui corrispondono le massime sollecitazioni indotte dalla corrente su sponde e fondo in quanto portate superiori determinerebbero il

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366	Foglio			8	di	25	

superamento delle arginature con innesco di un flusso anche in direzione trasversale all'asse fluviale. In tali condizioni pertanto ad un aumento di portata non corrisponderebbe un sostanziale aumento del tirante idrico né delle velocità in alveo e, conseguentemente nemmeno delle sollecitazioni prodotte dalla corrente.

Si ottiene:

$$Q_{\max} = 100,0 \text{ mc/sec}$$

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO						
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N° Doc. Cliente:
		Foglio	9	di	25	

#### 4 STUDIO IDRAULICO DEL TORRENTE TERDOPPIO

Il calcolo in moto permanente è stato eseguito tramite elaboratore elettronico con l'ausilio del programma di calcolo Hec-Ras, per le cui caratteristiche si rimanda all'annesso 1. Il tratto modellato ha una lunghezza di circa 110 m.

In particolare la sezione dell'attraversamento è quella che nel seguito viene indicata con il numero 20.

Sono state imposte come condizioni al contorno, a monte e a valle del tratto modellato, l'altezza di moto uniforme, calcolata con una pendenza pari a quella media del tratto rilevato.

Nella fincatura superiore delle sezioni allegate sono riportati i valori di scabrezza utilizzati per i vari tratti (secondo Manning), valori in linea con quanto contenuto nella Direttiva per il calcolo della piena di progetto dell'Autorità di Bacino del Fiume Po, che sono riassunti nella sottostante tabella:

Tipologia del corso d'acqua	Strickler $K_s = 1/n \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$
<b>CORSI D'ACQUA MINORI</b> (Raggio idraulico $\cong 2$ m; larghezza in piena < 30 m)	
Corsi d'acqua di pianura	
- alvei con fondo compatto, senza irregolarità	45-40
- alvei regolari con vegetazione erbacea	30-35
- alvei con ciottoli e irregolarità modeste	25-30
- alvei fortemente irregolari	25-15
Torrenti montani	
- fondo alveo con prevalenza di ghiaia e ciottoli, pochi grossi massi	30-25
- alveo in roccia regolare	30-25
- fondo alveo con ciottoli e molti grossi massi	20-15
- alveo in roccia irregolare	20-15
<b>CORSI D'ACQUA MAGGIORI</b> (Raggio idraulico $\cong 4$ m; larghezza in piena > 30 m)	
- sezioni con fondo limoso, scarpate regolari a debole copertura erbosa	45-40
- sezioni in depositi alluvionali, fondo sabbioso, scarpate regolari a copertura erbosa	35
- sezioni in depositi alluvionali, fondo regolare, scarpate irregolari con vegetazione arbustiva e arborea	25-30
- in depositi alluvionali, fondo irregolare, scarpate irregolari con forte presenza di vegetazione arbustiva e arborea	20-25

Tabella 1: valori caratteristici di scabrezza

I risultati, grafici e numerici, sono riportati nelle pagine seguenti.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366	Foglio 10 di 25					

terdoppio Plan: Plan 02 10/28/2012

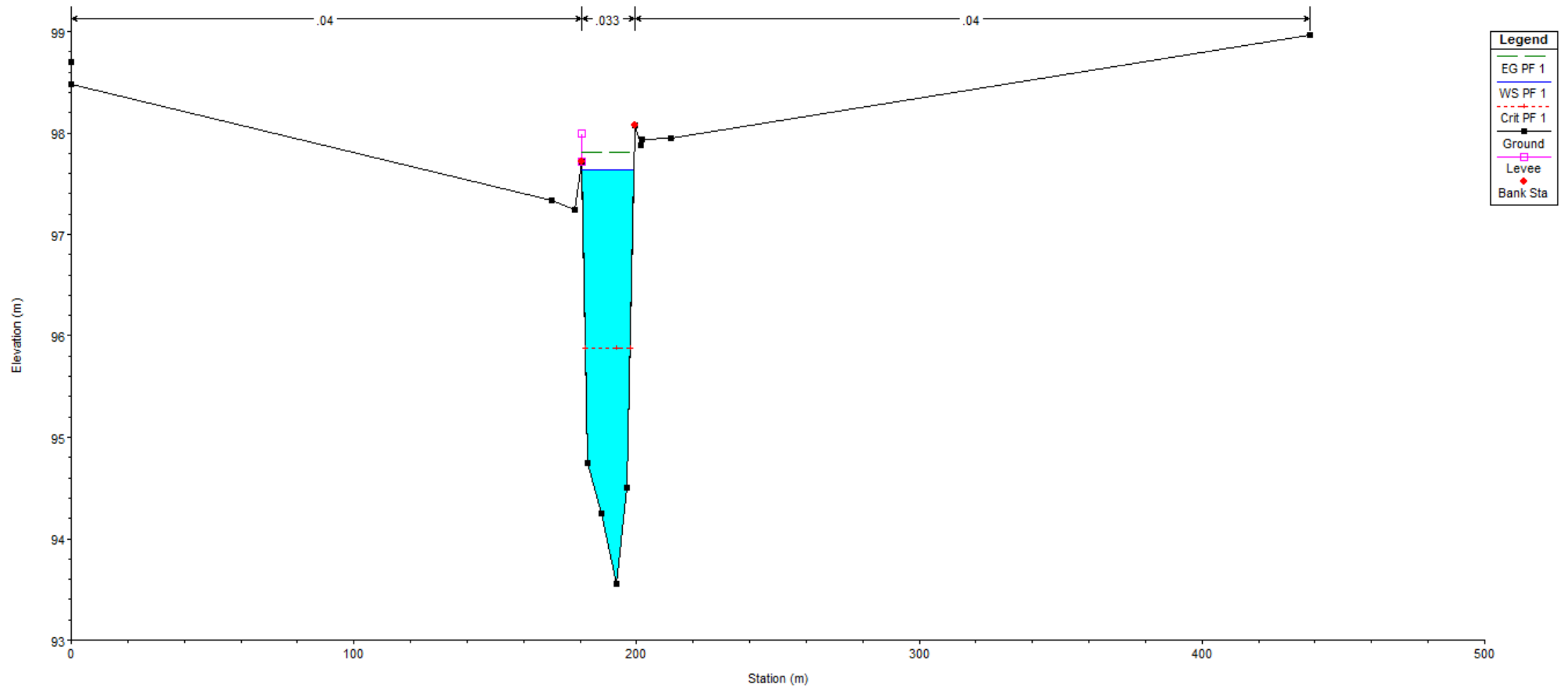


Figura 2.1: sezione trasversale all'inizio del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N° Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N° Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366	Foglio 11 di 25					

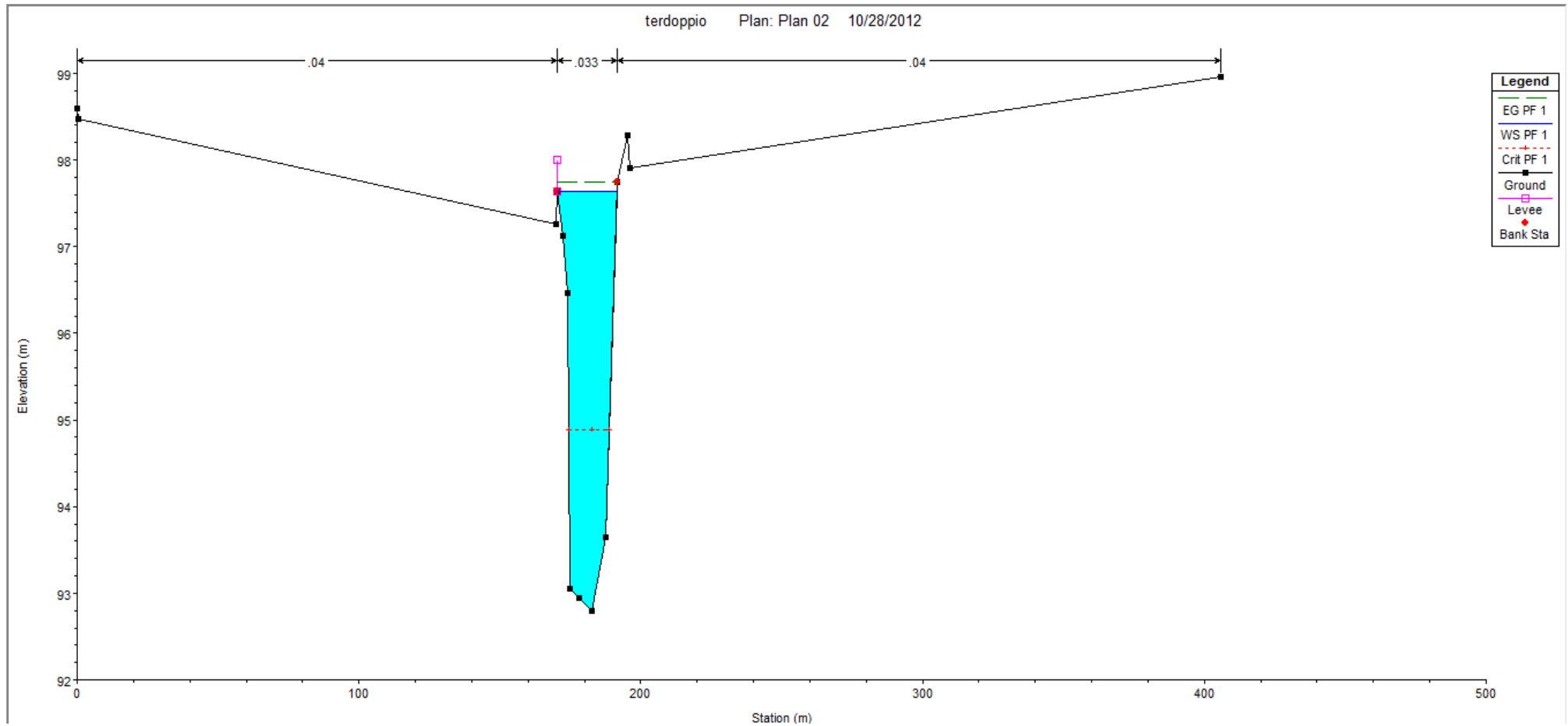
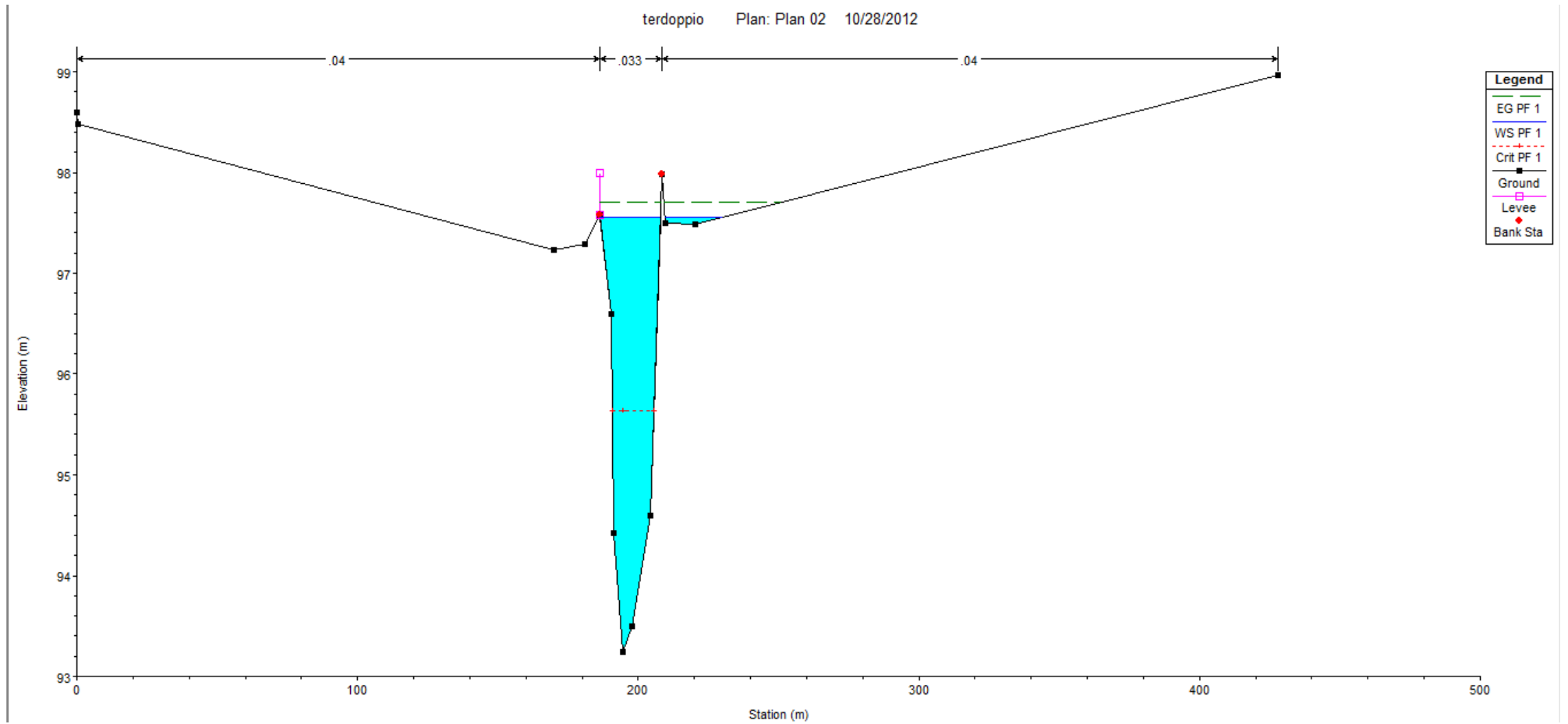


Figura 2.2: sezione trasversale in corrispondenza dell'attraversamento in subalveo

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 12 di 25					



Legend	
—	EG PF 1
—	WS PF 1
- - -	Crit PF 1
—	Ground
□	Levee
◆	Bank Sta

Figura 2.3: sezione trasversale a valle del tratto modellato

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N°Doc. Ingegneria:		Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366		Foglio 13 di 25					

Sezione	Q [mc/sec]	Quota fondo [m.s.m.]	Quota acqua [m.s.m.]	Altezza critica [m]	Carico Totale [m]	P. linea carichi [m]	Velocità [m/sec]	Area [mq]	Larghezza p. l. [m]	N. Froude	Raggio idr. [m]	$\tau$ alveo [N/mq]
30	100	93.56	97.64	95.88	97.8	0.001015	1.81	55.39	18.5	0.33	2.56	25.45
20	100	92.8	97.64	94.88	97.75	0.000574	1.42	70.18	20.95	0.25	2.75	15.48
10	100	93.24	97.56	95.64	97.71	0.001002	1.71	59.58	42.48	0.33	1.32	12.92

Tabella 2: grandezze caratteristiche in corrispondenza delle sezioni modellate

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>							
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>							
N° Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00					N° Doc. Cliente:
		Foglio		14	di		25

## 5 DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA PROFONDITÀ DI EROSIONE

Per la determinazione della profondità di posa della condotta si fa riferimento alle grandezze caratteristiche determinate per la portata sopra calcolata (a piene rive).

### 5.1 Erosione al fondo

Esistono vari studi, per lo più sperimentali, per la determinazione della massima profondità di erosione di un fondo d'alveo in corrispondenza di piene eccezionali, dovute principalmente:

1. alla presenza di discontinuità di fondo;
2. alla presenza di manufatti in alveo (pile, pennelli, briglie, ecc.);
3. alla presenza di curve;
4. alla propagazione di barre alterne;
5. a fenomeni di abbassamento generalizzato del fondo alveo.

Si possono fin da subito escludere le casistiche di cui ai punti 2, 3 e 5.

Per quanto riguarda i punti 2 e 3 infatti nel tratto in esame non sono presenti manufatti in alveo o curve.

Per quanto riguarda il punto 5 invece, il corso d'acqua presenta, nel tratto in esame, pendenze di fondo molto basse, prossime a quelle di equilibrio; si possono pertanto escludere fenomeni erosivi significativi.

Procediamo quindi ad analizzare i casi restanti.

#### Caso 1:

Nel caso in esame la possibile discontinuità di fondo si può correlare ad eventuali variazioni locali delle caratteristiche litologiche dei materiali costituenti il fondo alveo ovvero alla formazione di locali depositi di materiale più fine che, determinando un aumento locale della velocità a causa della minore scabrezza, potrebbe innescare fenomeni erosivi nel tratto d'alveo immediatamente a valle.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	15	di	25	

Dall'espressione di Shoklitsch<sup>1</sup>, utilizzando le grandezze caratteristiche del moto determinate ai paragrafi precedenti, assumendo come portata specifica

$q = Q/(\Omega/yu)$ , risulta:

$$S_{\max} = 1,65 \text{ m}$$

Su tale valore tuttavia è bene considerare che formule utilizzate consentono di determinare l'ordine di grandezza dei valori in gioco che pertanto vanno utilizzati con notevole cautela ed opportuni coefficienti di sicurezza. Per tali motivi, in considerazione delle caratteristiche dell'alveo fluviale e dei materiali presenti in sito, si ritiene opportuno considerare un coefficiente di sicurezza non inferiore a 2,00 risulta pertanto:

$$S_{\max \text{ buche}} = 1,65 * 2,00 = 3,30 \text{ m}$$

#### Caso 4:

Le barre alterne sono onde di sedimenti che si propagano molto lentamente sul fondo di corsi d'acqua dando luogo a sequenza di zone di scavo e di deposito.

Ipotizzando che l'evento di piena abbia una durata temporale abbastanza lunga da instaurare condizioni di moto assimilabili a quelle di moto permanente e uniforme, il criterio per l'esistenza di barre alterne, in moto permanente uniforme in un alveo rettilineo, è che:

$$\beta > \beta_c$$

Dove:

$$\beta = \frac{b_f}{2Y_{\text{med}}}$$

Con  $b_f$  larghezza del fondo e  $Y$  profondità media della corrente.

I valori di  $\beta_c$  si trovano rappresentati in grafici sperimentali in funzione della scabrezza relativa (intesa come rapporto tra il diametro medio dei sedimenti  $D$  e la profondità media della corrente  $Y$ ) e della tensione di Shields<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>  $S_{\max \text{ prog}} = 0,378 * H^{0,5} * q^{0,35}$  con  $H$ = carico totale

<sup>2</sup> cfr Annesso 2

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 16	di	25		

Esistono poi espressioni empiriche per il calcolo della massima altezza di deposito rispetto al fondo della buca di erosione.

Utilizzando l'espressione di Ikeda:

$$H_{b\max} = 0,18 * Y * \left(\frac{D}{Y}\right)^{0,45} * \beta^{1,45}$$

Nota la quale è possibile ricavare la massima profondità di erosione come:

$$\eta_{\max} = 0,50 \div 0,57 * H_{b\max}$$

Si ricavano quindi i risultati riportati nella seguente tabella:

<b>bf</b>	14,50
<b>Y</b>	4,84
<b>D</b>	0,005
<b>β</b>	1,49
<b>βc</b>	12,50
<b>H</b>	<b>No</b>
<b>μ<sub>max</sub></b>	<b>No</b>

Tabella 3: profondità di scavo prevedibile per la presenza di barre alterne

Poiché  $\beta < \beta_c$  non si ha la formazione di barre alterne.

## 5.2 Definizione della profondità di posa

Alla luce delle analisi di cui ai punti precedenti, si ritiene che la condizione più gravosa sia quella analizzata al punto 5.1 – caso 1, erosione dovuta ai possibili discontinuità in alveo, pertanto la profondità minima di posa della condotta dovrebbe risultare non inferiore a circa 3,30 m; poiché la tecnica esecutiva ipotizzata prevede di raggiungere una profondità di 8,30 m dal punto più depresso del fondo alveo, **si può ritenere la condotta sicuramente in sicurezza per una durata superiore alla sua vita utile.**

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 17 di 25				

## 6 VERIFICA AL SIFONAMENTO

Il sifonamento è un fenomeno che si può instaurare al piede di opere idrauliche (argini, briglie, palancolate, ecc.) collocate su terreni più o meno permeabili, sottoposte ad una differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera, nei casi in cui la forza dovuta al moto di filtrazione uguaglia o supera il peso sommerso del terreno.

La forza esercitata dal moto di filtrazione è funzione a sua volta del gradiente idraulico che lo alimenta (ovvero la differenza di carico idraulico tra monte e valle dell'opera divisa per la lunghezza del percorso di filtrazione), si definisce pertanto come *gradiente critico* il gradiente corrispondente all'innescarsi di questo fenomeno, il cui valore è strettamente dipendente dalle caratteristiche del terreno presente in sito.

Il gradiente caratteristico del moto di filtrazione è invece direttamente proporzionale alla differenza di carico esistente tra monte e valle dell'opera idraulica (nel ns. caso il rilevato arginale), per cui sarà tanto più grande (e quindi tanto maggiore l'energia del moto di filtrazione) tanto più grande sarà la differenza di carico.

Di conseguenza la problematica potrà manifestarsi con maggior probabilità nei canali pensili mentre sarà trascurabile in quelli con alveo parzialmente inciso.

Nel caso in esame in particolare, il torrente scorre in un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, per cui a regime, anche ipotizzando un livello idrico pari al completo riempimento della sezione, non ci sarà alcuna differenza di carico idraulico che possa innescare detto fenomeno. La verifica del presente paragrafo risulta quindi superflua.



<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 18 di 25				

## 7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha lo scopo di valutare l'idoneità della profondità di posa della nuova condotta per l'attraversamento in subalveo del Torrente Terdoppio che, si ricorda, verrà eseguito mediante realizzazione di un microtunnel, con diametro interno 2400 mm e una profondità di m. 8,30 rispetto al punto più depresso del fondo alveo.

Le verifiche condotte hanno evidenziato:

- che la profondità di posa della condotta risulta verificata rispetto alle massime profondità di scavo localizzato prevedibili in occasione delle massime piene contenute dalla sezione idraulica esistente anni con un coefficiente di sicurezza notevolmente superiore a 2,00;
- che la geometria del corso d'acqua nella zona dell'attraversamento, caratterizzata da un alveo completamente inciso rispetto al piano campagna, consente di escludere qualsiasi rischio di sifonamento sia nel breve che a lungo termine.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio	19	di	25	

## **ANNESSO 1: GENERALITÀ SUL MODELLO HEC-RAS**

Il software di calcolo utilizzato è denominato HEC-RAS® ed è stato sviluppato dell'Hydrologic Engineering Center dell'U.S. Army Corps of Engineers (California).

### ***Descrizione del modello di simulazione idraulica***

Il presente capitolo fornisce chiarimenti sul funzionamento del modello numerico adottato e sulla metodologia utilizzata nella scelta delle sezioni trasversali necessarie alle simulazioni.

Il modello calcola i profili di superficie libera in moto permanente gradualmente vario (in senso spaziale e non temporale) in alvei prismatici e non prismatici. Entrambi i tipi di corrente, lenta e veloce, possono essere calcolati così come le conseguenze di diverse tipologie di accidentalità e strutture di cui si conosca la relazione fra carico e portata defluente.

- Il modello è comunque vincolato nel suo utilizzo da tre condizioni:
- il moto deve essere permanente poiché le equazioni non contengono termini dipendenti dal tempo;
- il moto deve essere gradualmente vario in senso spaziale poiché le equazioni ipotizzano la distribuzione idrostatica delle pressioni in seno alla corrente;
- il moto è mono-dimensionale.

E' rilevante e importante evidenziare la capacità del modello di dare attendibili risultati nella gestione delle aree inondabili circostanti gli alvei naturali.

In questo senso è quindi possibile:

- determinare le aree inondabili da parte di portate diverse allo scopo di predisporre l'opportuna protezione;
- studiare le conseguenze d'uso delle aree golenali e il loro danneggiamento;
- definire i miglioramenti dell'alveo atti a ridurre le conseguenze delle inondazioni.

Proprio nell'ottica di queste problematiche l'utilizzo del modello numerico in questione risulta essere estremamente efficace.

La possibilità di determinare il comportamento del profilo del corso d'acqua tenendo conto anche dell'influenza esercitata dai manufatti in alveo consente di tracciare con buona precisione la via di piena e le sue caratteristiche.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
	Foglio 20 di 25					

Il modello di calcolo effettua simulazioni di moto permanente, situazione di calcolo che in realtà non si presenta, in quanto è noto dalla teoria che la portata massima in ogni sezione si presenta per un tempo limitato, presentando la curva (tempo, portata) una forma a campana, essendo presenti nel fenomeno delle piene vari fenomeni tra i quali i più noti sono l'effetto di laminazione del corso d'acqua, l'invaso e la corrivazione.

Nonostante tutto la simulazione assume rilevanza fondamentale perché, per i motivi sopra descritti, rappresenta una verifica in termini più gravosi del corso d'acqua (si presenta una portata elevata per tempi più lunghi di quelli che si hanno in realtà), permettendo quindi di fare raggiungere elevati gradi di sicurezza ai manufatti progettati secondo le indicazioni tratte da tale simulazione.

Tra le diverse opzioni di calcolo di cui il modello è dotato in relazione alla presenza di strutture che interagiscono direttamente con il corso d'acqua è da evidenziare la possibilità di calcolo del profilo in corrispondenza dei tombini (circolari, scatolari, con o senza muri d'ala....) secondo la normativa proposta da FHWA (Federal Highway Administration-USA). Il software implementato consente di determinare con precisione l'effetto di rigurgito dovuto alle spalle dei ponti o all'ingombro delle pile.

Particolare importanza riveste la possibilità di parametrizzare il coefficiente di scabrezza per alveo e golene.

Inoltre è possibile creare all'interno di ciascuna sezione trasversale del corso d'acqua più zone a scabrezza omogenea in modo da approssimare con precisione notevole il valore del suddetto parametro, troppo spesso legato all'imprecisione del coefficiente di scabrezza equivalente.

L'insieme dei dati di output è strutturato in modo da fornire la conoscenza globale dei fenomeni che interessano l'intera area occupata dalla portata di piena.

L'output risulta quindi suddiviso in dati relativi alle aree golenali e al canale principale di deflusso.

Le informazioni fornite riguardano diversi parametri fisici e di progettazione quali, per esempio:

- quota in m s.l.m. del pelo libero;
- quota del gradiente energetico;
- velocità e portata, relativa a golene e canale principale;
- larghezza del pelo libero;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 21	di 25			

- area bagnata;
- principali parametri geometrici;
- sezioni trasversali;
- profilo di moto permanente.

Per meglio comprendere il funzionamento del modello idraulico utilizzato è opportuno fornire una sintesi delle potenzialità e dei fondamenti teorici che stanno alla base del calcolo dei profili di moto permanente e che sono implementati nel modello stesso.

### **Calcolo del profilo di moto permanente**

Al fine di calcolare la quota del pelo libero incognita in una determinata sezione trasversale del corso d'acqua è stata adottata la procedura di calcolo nota come Standard Step Method, consistente nell'integrazione dell'equazione di bilancio energetico (fig. 1).

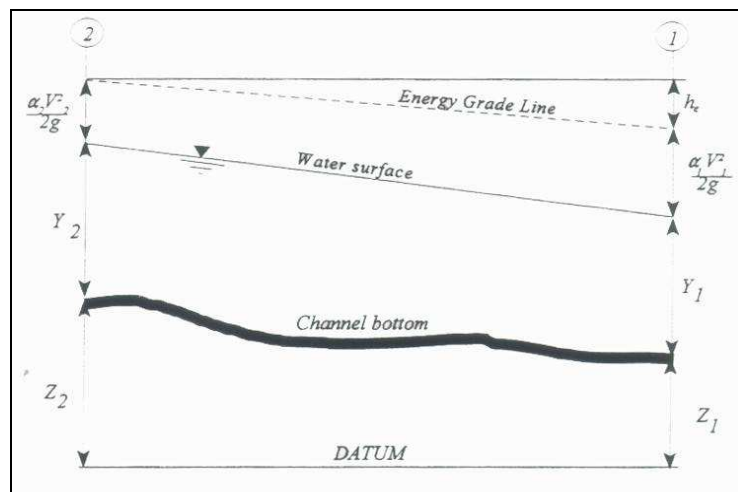


Fig. 1 - Rappresentazione dei termini dell'equazione di bilancio energetico.

Le due equazioni che proponiamo rappresentano il metodo di cui sopra:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

$$h_e = L \cdot \bar{S}f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

WS1, WS2 : quota del pelo libero fra due sezioni di calcolo, con la sezione 2 posta a monte della 1;

V1, V2 : velocità media;

α1, α2 : coefficienti energetici moltiplicativi della velocità;

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
		Foglio 22 di 25				

g : accelerazione gravitazionale;

h<sub>e</sub> : perdita di carico;

L : distanza fra le sezioni trasversali;

Sf : pendenza media;

C : coefficiente di perdita per contrazione o espansione (vedi tab.1).

La distanza L viene calcolata utilizzando la seguente espressione:

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

Dove

L<sub>lob</sub>, L<sub>ch</sub>, L<sub>rob</sub>: sono le distanze tra due sezioni trasversali consecutive, rispettivamente per la gola di sinistra, il canale di magra e la gola di destra;

$\overline{Q_{lob}}$ ,  $\overline{Q_{ch}}$ ,  $\overline{Q_{rob}}$  : sono le medie aritmetiche delle portate delle tre parti suddette.

Mentre la pendenza motrice Sf viene calcolata con l'equazione di Manning:

$$Sf = \left( \frac{Q}{K} \right)^2$$

Ulteriore punto fondamentale nella comprensione del funzionamento del modello idraulico è la suddivisione della massa liquida defluente in unità elementari per le quali la velocità è distribuita uniformemente.

TRANSITION CLASS	CONTRACTIO N	EXPANSIO N
No transition loss	0.0	0.0
Gradual transitions	0.1	0.3
Bridge sections	0.3	0.5
Abrupt transitions	0.6	0.8

Tabella di riferimento dei coefficienti di contrazione ed espansione.

Individuata la sezione trasversale del corso d'acqua attraverso la griglia dei punti x (distanze progressive dall'ascissa x = 0) e y (quote m s.l.m. relative ai punti definiti alle varie progressive), nelle aree golenali le unità elementari di deflusso coincidono con la suddivisione creata dalle progressive all'interno della sezione trasversale.

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio 23	di 25			

Nel canale principale di deflusso (o alveo di magra ordinaria) la massa liquida defluente non viene suddivisa tranne nel caso in cui si conferiscano più valori di scabrezza differenti in alveo.

In funzione del numero di differenziazioni del valore della scabrezza saranno individuate corrispondenti unità di deflusso (fig. 2).

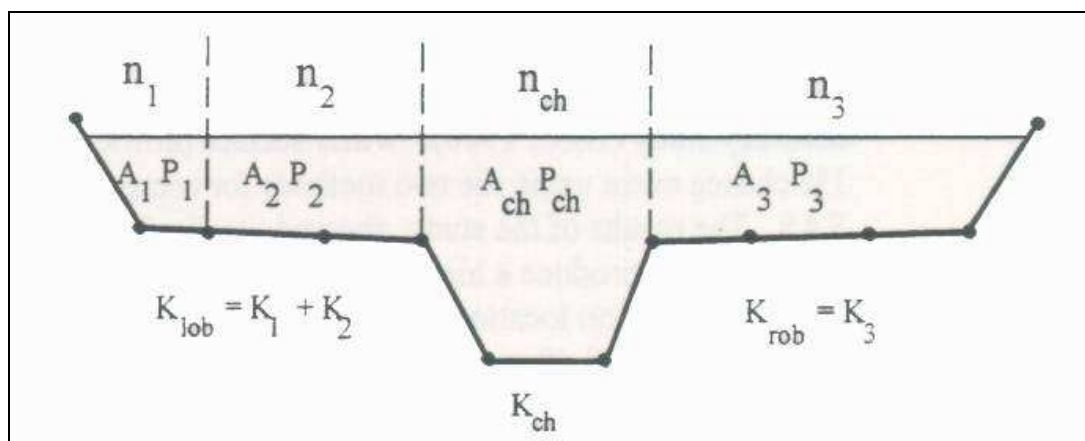


Fig. 2 - Suddivisione dell'alveo in singole unità di deflusso

La capacità di deflusso per ciascuna suddivisione è pertanto calcolata con le seguenti espressioni:

$$Q = K \cdot \sqrt{Sf}$$

$$K = \frac{1,486}{n} aR^{2/3}$$

dove

Q : portata per unità elementare;

K : capacità di deflusso per unità elementare;

n : coefficiente di Manning per la scabrezza dell'unità elementare;

a : area di deflusso dell'unità elementare;

R : raggio idraulico per l'unità di deflusso elementare.

La capacità totale di deflusso per la sezione trasversale è ottenuta per sommatoria delle singole capacità relative alle unità in cui la sezione è stata scomposta.

Sulla base di queste considerazioni il coefficiente  $\alpha$ , relativo alla velocità, si ottiene dalla seguente espressione (fig.3):

<b>METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar</b>						
<b>RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO</b>						
N°Doc. Ingegneria: J01811-PPL-RE-004-0366	Rev.: 00					N°Doc. Cliente:
		Foglio	24	di	25	

$$\alpha = \frac{(A_t)^2 \left[ \frac{(K_{lob})^3}{(A_{lob})^2} + \frac{(K_{ch})^3}{(A_{ch})^2} + \frac{(K_{rob})^3}{(A_{rob})^2} \right]}{(K_t)^3}$$

dove:

$A_t$  : area totale di deflusso per la sezione trasversale;

$A_{lob}$ ,  $A_{ch}$ ,  $A_{rob}$  : area di deflusso per golena sinistra, canale principale, golena destra;

$K_t$  : capacità totale di deflusso (conveyance) della sezione trasversale;

$K_{lob}$ ,  $K_{ch}$ ,  $K_{rob}$  : capacità di deflusso di golena sinistra, canale principale e golena destra.

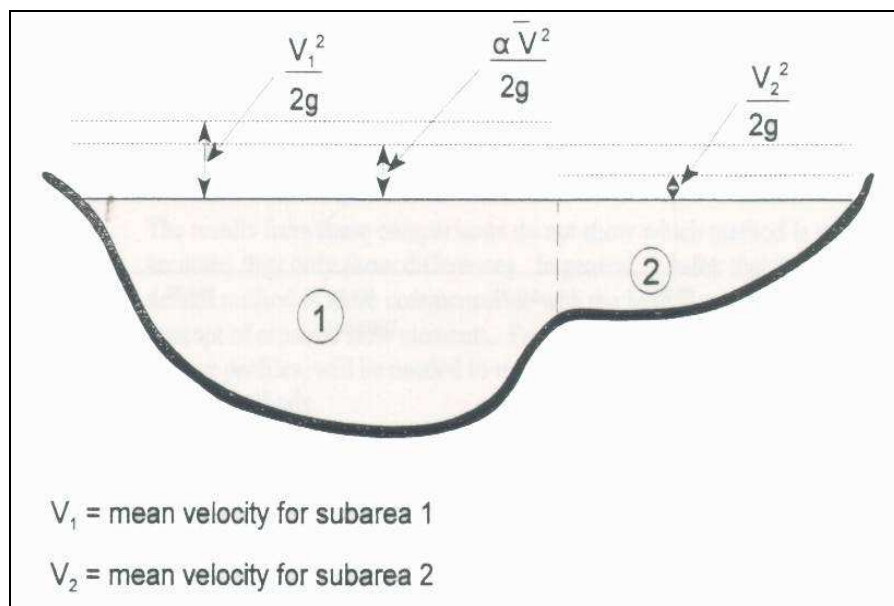


Fig.3 - Esempio di calcolo della energia media sulla sezione trasversale

Il coefficiente  $\alpha$  si ottiene allora come media pesata delle varie capacità di deflusso.

Le perdite di carico dovute ad attrito sono calcolate come prodotto della pendenza media motrice  $S_f$  e della distanza  $L$  fra due sezioni trasversali consecutive.

Le perdite di carico dovute a contrazione e/o espansione sono calcolate con la usuale espressione riportata nell'equazione seguente:

$$h_0 = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove  $C$  rappresenta il già citato coefficiente di contrazione/espansione

METANODOTTO CERVIGNANO-MORTARA DN 1400 (56") DP 75 bar						
RELAZIONE IDROLOGICA-IDRAULICA TORRENTE TERDOPPIO						
N°Doc. Ingegneria:	Rev.:	00				N°Doc. Cliente:
J01811-PPL-RE-004-0366	Foglio 25 di 25					

**ANNESSO 2: TABELLE PER LA DETERMINAZIONE DI  $d_0$  E  $\beta_c$**

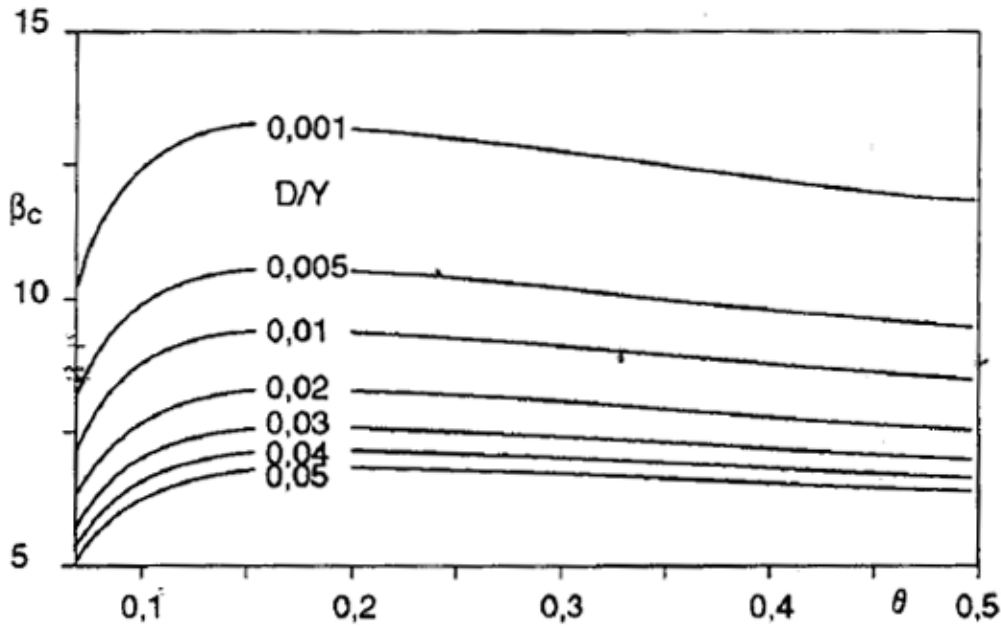


Tabella per la determinazione di  $\beta_c^3$

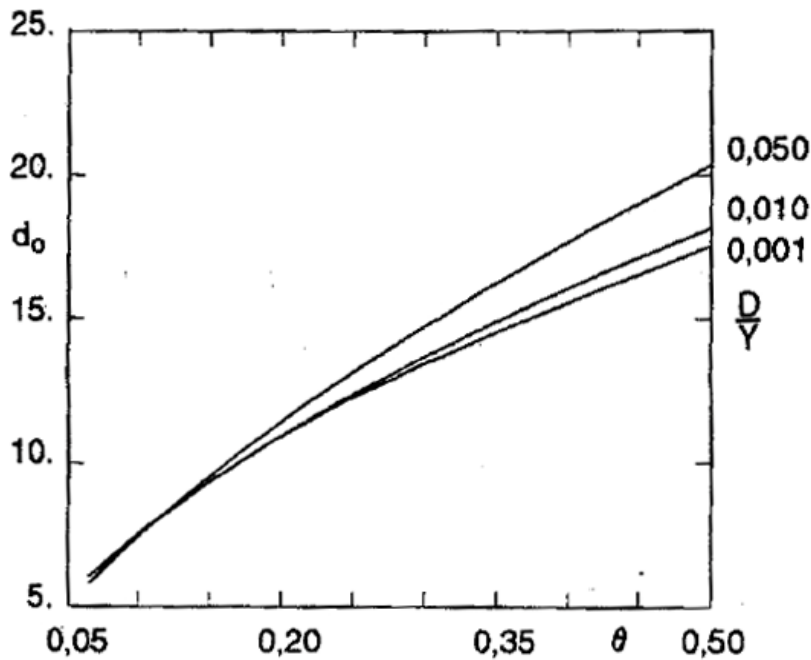


Tabella per la determinazione di  $d_0^4$

<sup>3</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna

<sup>4</sup> Tratto da "Manuale di Ingegneria Civile" casa Editrice Zanichelli-ESAC, Bologna