

autostrade // per l'italia

AUTOSTRADA (A1) : MILANO NAPOLI

AMPLIAMENTO ALLA QUARTA CORSIA
DEL TRATTO MILANO SUD (Tang. Ovest) – LODI

PROGETTO DEFINITIVO

CORPO AUTOSTRADALE

IDROLOGIA IDRAULICA
INTERFERENZE IDROGRAFICHE

Relazione idrologico-idraulica

IL RESPONSABILE PROGETTAZIONE
SPECIALISTICA

Ing. Maurizio Torresi
Ord. Ingg. Milano N. 16492

RESPONSABILE UFFICIO IDR

IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Massimiliano Giacobbi
Ord. Ingg. Milano N. 20746


RESPONSABILE AREA DI PROGETTO MILANO

IL DIRETTORE TECNICO

Ing. Maurizio Torresi
Ord. Ingg. Milano N. 16492

RESPONSABILE FUNZIONE STP

WBS	RIFERIMENTO ELABORATO				DATA: APRILE 2011	REVISIONE													
	DIRETTORIO		FILE			n.	data												
	codice commessa	N.Prog.	unita'	n. progressivo		01	APRILE 2011												
	1	1	0	1	5	9	0	1	I	D	R	0	0	0	3	-	1		
	SCALA:																		

 ingegneria europea	COORDINATORE OPERATIVO DI PROGETTO Ing. Federica Ferrari	ELABORAZIONE GRAFICA A CURA DI :	
		ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI :	
CONSULENZA A CURA DI :		IL RESPONSABILE UFFICIO/UNITA'	

VISTO DEL COORDINATORE GENERALE SPEA DIREZIONE OPERATIVA PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE LAVORI ASPI Ing. Alberto Selleri	VISTO DEL COMMITTENTE autostrade // per l'italia	VISTO DEL CONCEDENTE 
--	--	---

AUTOSTRADA A1 – MILANO – NAPOLI
AMPLIAMENTO ALLA 4° CORSIA
TRATTO MILANO SUD (TANGENZIALE OVEST) – LODI

PROGETTO DEFINITIVO

CORPO AUTOSTRADALE

IDROLOGIA E IDRAULICA

INTERFERENZE IDROGRAFICHE

RELAZIONE IDROLOGIO IDRAULICA

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	ASSETTO MORFOLOGICO E IDROGRAFICO ATTUALE.....	3
2.1	INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO.....	3
2.2	INQUADRAMENTO IDROGRAFICO.....	3
2.2.1	<i>Fiume Lambro.....</i>	3
2.2.2	<i>Idrografia Secondaria</i>	4
2.2.3	<i>Reti Irrigue Minori</i>	5
3	ANALISI IDROLOGICA DELLE INTERFERENZE IDROGRAFICHE	5
3.1	FIUME LAMBRO E SUOI AFFLUENTI: ANALISI DELLE CRITICITA' E DELLE PORTATE DI PIENA 5	
3.1.1	<i>Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico inerente al Fiume Lambro.....</i>	5
3.1.2	<i>Cavo Redefossi</i>	6
3.1.3	<i>Roggia Vettabbia</i>	7
3.1.4	<i>Canale Addetta</i>	7
3.2	REGIMAZIONE IDRAULICA DELLE RETI CONSORZIALI	7
3.2.1	<i>Cavo Lorini-Marocco del Consorzio Olona.....</i>	7
3.2.2	<i>Rogge del Consorzio Muzza-Bassa Lodigiana.....</i>	8
3.2.3	<i>Fossati irrigui privati.....</i>	8
4	ANALISI IDRAULICA DELLE INTERFERENZE IDROGRAFICHE.....	8
4.1	MODELLAZIONE HEC-RAS PER IL PONTE SUL FIUME LAMBRO	9
4.1.1	<i>Software HEC-RAS</i>	9
4.1.2	<i>Sezioni utilizzate</i>	10
4.1.3	<i>Risultati delle simulazioni.....</i>	10
4.1.4	<i>Verifica delle pile in riva sinistra alveo.....</i>	14
4.2	CALCOLO DI VERIFICA DELLE PORTATE MASSIME DEFLUIBILI IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE D'ARTE DEL RETICOLO IDROGRAFICO SECONDARIO.....	18
4.3	CALCOLO DI VERIFICA DELLE PORTATE MASSIME SCARICABILI DALLE TOMBINATURE DELLE RETI IRRIGUE MINORI.....	22
5	INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA DEGLI ALVEI.....	23
5.1	INTERVENTI SULL'ALVEO DEL FIUME LAMBRO	23
5.1.1	<i>Metodo delle tensioni di trascinamento</i>	24
5.2	INTERVENTI SUGLI ALVEI DELLE OPERE D'ARTE SECONDARIE E MINORI	26

1 PREMESSA

Il presente studio è volto all'analisi idrologico-idraulica delle interferenze idrografiche indotte dai corsi d'acqua principali, secondari e minori, sia naturali che artificiali, intersecanti il corpo autostradale in oggetto.

Tale analisi costituisce la premessa indispensabile per la definizione degli interventi di sistemazione idraulica e di difesa da adottarsi, nonché per la verifica della compatibilità idraulica fra gli scarichi delle nuove infrastrutture e i corpi idrici ricettori.

Quest'ultimo aspetto si riferisce, essenzialmente, alla impostazione e quantificazione del sistema di scarico delle acque della piattaforma, per le quali è stata prevista la laminazione all'interno dei fossi di guardia, da realizzarsi mediante opportuni limitatori di portata.

L'effetto della laminazione potrà comportare, per l'intera infrastruttura, valori di portata restituita assai più contenuti rispetto agli attuali, riducendo sensibilmente il rischio di sovraccarico idraulico negli attuali ricettori.

In questa sede, tuttavia, onde adottare un maggior coefficiente di sicurezza, si prenderà in considerazione il valore delle portate totali di piattaforma inerenti ai volumi di seconda pioggia, che in ogni caso dovrebbero essere scaricati in continuo.

2 ASSETTO MORFOLOGICO E IDROGRAFICO ATTUALE

2.1 INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

Il tracciato autostradale in oggetto si sviluppa su un contesto geo-morfologico alluvionale, depositato durante il Cataglaciale Wurniano e successivamente modellato dalle divagazioni idrografiche dell'Olocene recente.

Si tratta di depositi fluvio-glaciali a ghiaie e sabbie prevalenti, superiormente pedogenizzati, che costituiscono l'orizzonte dell'Alta Pianura lombarda posta a settentrione del Fiume Po.

Nell'area di interesse, tale morfologia è stata profondamente rielaborata dalla secolare attività antropica, non solo a livello di paesaggio, ma anche e soprattutto per quanto riguarda l'assetto idrografico.

Infatti, prescindendo dal corso del Fiume Lambro, il cui alveo conserva grosso modo la configurazione già presente in epoca storica, il restante reticolo idraulico è stato modificato ed esteso in funzione di una capillare regimazione irrigua.

Il solo Cavo Sillaro, in alcuni tratti a nord del tracciato autostradale, occupa tuttora i meandri di un antico paleoalveo, probabilmente del Fiume Adda.

2.2 INQUADRAMENTO IDROGRAFICO

Il tracciato autostradale in oggetto è interessato dall'attraversamento dell'alveo del Fiume Lambro, che ne determina l'interferenza principale, e da una complessa rete di canali, rogge e fossati irrigui, da considerarsi come interferenze secondarie o minori.

Facendo riferimento alla Corografia in scala 1:10.000 allegata, il sistema idrografico presente nell'area risulta come segue.

2.2.1 Fiume Lambro

Il Fiume Lambro ha un bacino idrografico complessivo di 1.950 kmq e una lunghezza dell'asta principale di circa 137 km.

Nasce presso Pian del Rancio, nel Comune di Magreglio (CO). alla quota di 950 m s.l.m..

Sotto il profilo idraulico generale, può essere distinto in quattro tratte di differenti caratteristiche:

- a) tratta prelacuale, prima dell'immissione nel Lago Pusiano, a carattere torrentizio, con alveo incassato, forti pendenze e scarso livello di urbanizzazione;
- b) tratta settentrionale compresa tra il Lago Pusiano e Villasanta, con alveo abbastanza incassato e con livelli di urbanizzazione bassi;
- c) tratta centrale compresa tra Villasanta e la confluenza con il Deviatore Redefossi a S. Donato Milanese, in cui il fiume attraversa territori pianeggianti, fortemente antropizzati e urbanizzati con lunghi tratti canalizzati, vincolati da numerosi ponti ed attraversamenti; in questa tratta vengono raccolti i contributi idrici degli scaricatori delle reti fognarie comunali di Monza, Sesto San Giovanni e Milano;
- d) tratta meridionale a valle del Redefossi e fino alla confluenza nel Fiume Po, su territori pianeggianti, caratterizzati da un complesso reticolo irriguo; in questa tratta il Lambro sottopassa l'Autostrada fra le Progr. Km 11+728,57 e 11+874,79.

2.2.2 Idrografia Secondaria

La rete idrografica secondaria della zona è costituita da corsi d'acqua, alcuni naturali ma per lo più artificiali, indicati come cavi, canali, rogge, colatori, la cui portata è regolata a scopo irriguo e/o di scolo dai seguenti Consorzi di Bonifica:

1. Consorzio di Bonifica Est Ticino-Villoresi, il cui comprensorio si estende in riva destra del Fiume Lambro;
2. Consorzio di Bonifica Muzza-Bassa Lodigiana, con comprensorio in sinistra Lambro;
3. Consorzio Irriguo Naviglio Olona, per quanto riguarda il solo Cavo Lorini-Marocco.

La rete idrografica dal comprensorio Est Ticino-Villoresi, interferisce con il tracciato autostradale in oggetto solamente con il reticolo irriguo minore di competenza e gestione privata, di cui fa parte la Roggia Viscontea.

La Roggia Vettabbia, infatti, che costituisce la più rilevante struttura di scolo presente nell'area, unitamente al Cavo Redefossi, si mantiene parallela all'Autostrada, per scaricarsi nel Fiume Lambro a nord di Melegnano.

Il Cavo Lorini-Marocco, di competenza del Naviglio Olona, attraversa l'autostrada alla Progr. Km 13+262,44.

La totalità delle restanti interferenze idrografiche secondarie è indotta dal sistema irriguo e di scolo del Consorzio di Bonifica Muzza-Bassa Lodigiana, con i seguenti cavi e rogge:

Corso d'acqua	Progressiva di attraversamento [Km]
Roggia Ospitalia	14+704,33
Roggia Badia	17+176,35
Roggia Artesana	17+319,37
Cavo Sillaro Bargano	18+432,94
Roggia Balzarina	19+892,08
Roggia Dentina	19+993,62
Roggia Urbana	20+075,08

Roggia Vitalona	20+645,98
Roggia Barbavara	21+327,10
Cavo Sillaro Salerano	21+795,37

2.2.3 Reti Irrigue Minori

Le interferenze idrografiche minori sono relative ad un'estesa rete di fossati di competenza privata, utilizzati per l'irrigazione agricola nel semestre estivo e per lo scolo delle colaticce nel semestre invernale.

3 ANALISI IDROLOGICA DELLE INTERFERENZE IDROGRAFICHE

I corsi d'acqua principali, secondari e minori sopra descritti determinano interferenze con il tracciato autostradale in oggetto di rilevanza progressivamente decrescente passando dal Fiume Lambro, alle Rogge consorziali, ai più modesti fossati irrigui privati.

L'interferenza più rilevante è senza dubbio quella relativa al ponte sul Lambro, per il rischio idraulico connesso ai regimi idrometrici di tale fiume, in relazione all'estensione del suo bacino imbrifero e alle criticità dei suoi numerosi affluenti di monte.

Ben diversa è la situazione inerente ai restanti corsi d'acqua, le cui portate vengono per lo più regolate a scopo irriguo con paratoie, sostegni, partitori e altri manufatti dai rispettivi Consorzi.

Tale regolazione si ripercuote poi anche sul reticolo minore dei fossati gestiti dai privati.

3.1 FIUME LAMBRO E SUOI AFFLUENTI: ANALISI DELLE CRITICITÀ E DELLE PORTATE DI PIENA

Prendendo in considerazione la tratta del Fiume Lambro posta a cavallo dell'attraversamento autostradale e fra gli abitati di Melegnano, Riozzo e Cerro al Lambro, sulla base della ricerca AVI (Aree Vulnerate Italiane) risultano a tutto il 2000 n° 3 eventi di esondazione a cui deve essere aggiunto l'importante evento di piena avvenuto nel Novembre 2002.

Tali fenomeni sono stati determinati dagli apporti dell'intero sistema idrografico immissario di monte, nonché dai contributi di piena degli immissari poco a monte di Melegnano, costituiti dal Cavo Redefossi, dalla Roggia Vetabbia e dal Canale Addetta.

3.1.1 Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico inerente al Fiume Lambro

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) ha come obiettivo la definizione dei dati idrologici di riferimento per le procedure di valutazione della compatibilità idraulica delle opere di interesse pubblico, all'interno delle Facc A e B di cui all'Art 38 delle Norme di attuazione del PAI.

Per quanto riguarda il Fiume Lambro, le serie storiche mostrano che, negli ultimi decenni, l'intervallo temporale tra eventi critici consecutivi è nell'ordine di 2÷3 anni.

I dati forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po individuano le criticità maggiori nelle tratte idrografiche centro-meridionali del fiume, in corrispondenza delle aree più urbanizzate.

Tuttavia, per la tratta oggetto del presente studio, non sono stati forniti dati puntuali da parte dei rispettivi Comuni.

Pertanto, la stima delle portate di piena del Lambro è stata effettuata in n° 3 sole sezioni significative:

- a) Lambrugo, alla Progr. Km 20,43;

- b) Milano, alla Progr. Km 70,64;
- c) Confluenza Po, alla Progr. Km 137,43.

Tali portate sono state determinate per tempi di ritorno di 20,100,200 e 500 anni, come segue.

Corso d'acqua	Progr. (km)	Sezione Cod.	Denomin.	Superficie kmq	Q20 mc/s	Q100 mc/s	Q200 mc/s	Q500 mc/s
Lambro	20.428	132	Lambrugo	170	80	100	120	140
Lambro	70.636	76	Milano	465	350	490	550	630
Lambro	137.400	1	Confluenza in Po	1950	650	950	1080	1200

Da questi dati è stata desunta tramite estrapolazione lineare la $Q_{10} = 290$ mc/sec. Tale valore di portata è stato utilizzato per dimensionare le opere provvisionali.

Va evidenziato che, durante l'evento di piena del Novembre 2002, evento che in termini statistici può essere collocato su tempi di ritorno di circa 200 anni, sono state misurate portate al colmo di circa 100 mc/sec a Lambrugo e di 160 mc/sec a Milano.

Confrontando questi valori con i precedenti, risulta evidente uno scostamento significativo.

In effetti, a far data dalla prima entrata in funzione del 1958 della tratta autostradale in oggetto, in corrispondenza del ponte sul Lambro non si sono verificate criticità idrauliche di rilievo.

3.1.2 Cavo Redefossi

Il Cavo Redefossi ha origine nel territorio di Milano, al ponte di Gabelle nei pressi di Porta Nuova, dove raccoglie le acque del torrente Seveso e del Naviglio della Martesana.

Originariamente il Redefossi usciva dal tratto tombinato nei pressi del confine comunale di Milano, sbucando a cielo aperto, con un alveo a sezione trapezia, per poi snodarsi a fianco della Via Emilia, fino ad immettersi nel Lambro poco a monte di Melegnano, dopo la confluenza con la Roggia Vettabbia.

Negli anni '60 sono stati realizzati interventi per difendere S. Donato e S. Giuliano Milanese dalle esondazioni del Redefossi, eliminando da questo le portate del Naviglio Martesana e del Torrente Trobbia, immesse nel Lambro, mediante un manufatto di regolazione munito di paratoie elettromeccaniche.

Successivamente, il Comune di Milano attuava ulteriori interventi volti ad alleggerire il carico idraulico sul cavo, quali lo scolmatore di Viale Forlanini e lo scaricatore di Nosedo al Lambro Meridionale.

Il tratto tombinato del Cavo Redefossi in Comune S. Donato Milanese è dimensionato per una portata massima di 140 mc/s che, a seguito dello scarico in Lambro di 65 mc/sec, viene ridotta a 75 mc/sec.

3.1.3 Roggia Vettabbia

La Roggia Vettabbia scorre nel paleoalveo del Torrente Seveso a valle di Milano e confluisce nel Cavo Redefossi alla periferia nord di Melegnano, poco prima della confluenza del Redefossi nel Lambro.

La Roggia Vettabbia ha svolto, per decenni, la funzione di collettore fognario di sud-est di Milano e solo con il funzionamento a pieno regime del depuratore di Nosedo sta recuperato un equilibrio quali-quantitativo delle acque.

La Roggia Vettabbia è gestita dal Consorzio di Bonifica Est Ticino – Villoresti.

3.1.4 Canale Addetta

Il Canale Addetta ha origine a Paullo dal Canale Muzza di competenza del Consorzio di Bonifica Muzza-Bassa Lodigiana e sfocia nel fiume Lambro a monte di Melegnano.

Il canale ripercorre un paleoalveo del Fiume Adda e, pur svolgendo funzioni di canale irriguo, ha mantenuto le caratteristiche di corso d'acqua naturale.

La derivazione dal Canale Muzza è regolata dall'impianto di Paullo gestito dal Consorzio Muzza.

3.2 REGIMAZIONE IDRAULICA DELLE RETI CONSORZIALI

Come già anticipato al precedente paragrafo i corsi d'acqua per lo più artificiali gestiti dai Consorzi Est Ticino-Villoresti, Muzza-Bassa Lodigiana e Naviglio Olona sono tutti regimati da manufatti idraulici, in modo tale da mantenersi entro i limiti idrometrici previsti all'atto della loro esecuzione o imposti dalle sezioni delle tratte in alveo naturale.

Qualsiasi evento meteorico che si verifichi a sistema invasato nel periodo irriguo, viene attentamente monitorato dalle guardie idrauliche consortili che, se necessario, regolano le derivazioni onde scongiurare tracimazioni.

Talchè, a tutt'oggi, in corrispondenza degli attraversamenti autostradali non risultano particolari problematiche di deflusso e tanto meno di insufficienza idraulica.

3.2.1 Cavo Lorini-Marocco del Consorzio Olona

Questo canale ha origine del già citato Canale Addetta del Consorzio Muzza, con un manufatto di presa e regolazione dotato di scaricatore di emergenza nell'Addetta stessa.

In regime irriguo estivo, la sua portata è fissata in 8,00 mc/sec, che possono salire a 10,00 mc/sec in caso di massima piena.

Una volta sottopassato il ponte Autostrada, quasi in fregio alla carreggiata sud, è presente un importante nodo idraulico, costituito da un sostegno sul canale a n°2 paratoie, con uno sfioratore a sifone laterale e un manufatto per la derivazione di un cavo irriguo in riva sinistra.

Quest'ultimo è regolato da n° 2 paratoie alloggiare in piccolo fabbricato coperto.

A valle di tale fabbricato, e prima del sostegno, è stato installato un sifone di sfioro per regolare ulteriormente la portata nel canale principale.

Proseguendo poi a valle con una tratta rettilinea di circa 500 m, il canale stesso sovrappassa il Fiume Lambro per attuare l'irrigazione dei terreni a sud di Cerro al Lambro.

3.2.2 Rogge del Consorzio Muzza-Bassa Lodigiana

Come esposto pocanzi la funzione delle rogge tabellate è promiscua, di irrigazione e di scolo, salvo i Cavi Sillaro Bargano e Salerano che hanno funzione solamente di scolo.

Durante il semestre estivo, che inizia ai primi di Aprile, il Consorzio regola un deflusso “nominale” che può raggiungere un valore massimo del 50% in più, al fine di assicurare le esigenze irrigue degli utenti, come segue:

- Roggia Ospitalia:	600,00 l/sec	–	max 900,00 l/sec
- Roggia Badia	1200,00 l/sec	–	max 1.800,00 l/sec
- Roggia Artesana	800,00 l/sec	–	max 1.200,00 l/sec
- Roggia Balzarina	750,00 l/sec	–	max 1.125,00 l/sec
- Roggia Dentina	500,00 l/sec	–	max 750,00 l/sec
- Roggia Urbana	500,00 l/sec	–	max 750,00 l/sec
- Roggia Vitalona	1000,00 l/sec	–	max 1.500,00 l/sec
- Roggia Barbavara	2500,00 l/sec	–	max 3.750,00 l/sec

Le portate nominali irrigue indicate, determinano in tutti i casi un invaso di sicurezza dei rispettivi alvei, in modo da assicurare franchi sufficienti a recepire eventuali apporti imbriferi anche di forte intensità.

I Cavi Sillaro anzidetti sono invece “colatori”, cioè recepiscono le sole colaticce di monte, che possono presentare portate variabili, ma comunque ampiamente nei limiti degli alvei, non presentandosi mai in condizioni di invaso irriguo.

3.2.3 Fossati irrigui privati

Un fitto reticolo di fossati e scoline sottopassa la tratta autostradale in oggetto con tombature circolari o scatolari e in qualche caso con ponticelli di luce ridotta.

Si tratta di una rete idrografica minore, anch’essa a funzionamento bivalente, di irrigazione estiva e di scolo iemale, che i rispettivi Consorzi hanno lasciato in carico ai proprietari agricoli frontisti, sia per quanto riguarda l’esercizio che la manutenzione.

Questa rete è alimentata dalle rogge consorziali predette mediante chiavichette, bocchelli, ecc, e pertanto entra in asciutta con lo svasso irriguo del sistema alimentatore.

Viste le modeste portate veicolate, anche questa rete capillare non ha a tutt’oggi evidenziato criticità particolari, se non sporadici casi dovuti essenzialmente a carenze manutentive.

4 ANALISI IDRAULICA DELLE INTERFERENZE IDROGRAFICHE

L’ampliamento simmetrico della piattaforma autostradale, pari a circa 4,00 m per ciascuna carreggiata, comporterà l’adeguamento di tutti i manufatti di attraversamento dell’articolato sistema idraulico principale, secondario e minore precedentemente descritto.

Tali adeguamenti dovranno essere realizzati in modo da non incrementare l’attuale grado di rischio idraulico per quanto attiene l’interferenza principale del ponte sul Fiume Lambro e quelle secondarie dei ponti sul Cavo Lorini-Marocco del Consorzio Olona e sulle Rogge Sillaro e Barbavara del Consorzio Muzza-Bassa Lodigiana.

La modellazione idraulica delle aste idrografiche connesse, effettuata per tempi di ritorno di 10 e 200 anni, dimostra che il ridotto allungamento simmetrico delle strutture non comporterà variazioni significative nella propagazione delle onde di piena e quindi nelle altezze dei livelli idrici raggiunti in corrispondenza delle varie sezioni considerate.

Parimenti, il limitato livello di rischio idraulico documentato per le restanti interferenze secondarie e minori, conferma che l'allungamento delle strutture esistenti con altre dimensionalmente simili non determinerà criticità particolari.

La modellazione idraulica dell'alveo del Fiume Lambro, in corrispondenza dell'attraversamento autostradale, viene eseguita mediante il software HEC-RAS del Hydrogeologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers.

Per i restanti corsi d'acqua secondari e minori vengono invece utilizzate scale di deflusso in moto uniforme, volte alla verifica delle portate massime a pelo libero defluibili sotto i ponti, gli scatolari e le tombinature esistenti.

4.1 MODELLAZIONE HEC-RAS PER IL PONTE SUL FIUME LAMBRO

Per la progettazione dell'opera in esame, si è provveduto al calcolo e all'analisi delle variazioni del profilo idraulico del fiume indotte dalla presenza delle pile in alveo del viadotto.

Le pile in questione sono poste ai margini dell'alveo inciso e sull'area golenale in sinistra idraulica.

I profili idraulici per le varie portate, sono stati tracciati in moto permanente utilizzando un modello HEC-RAS di calcolo numerico monodimensionale.

Per il calcolo si sono utilizzate le portate $Q_{10} = 290$ mc/sec e $Q_{200} = 550$ mc/sec, di cui al paragrafo precedente.

4.1.1 Software HEC-RAS

Il software Hec-Ras è un sistema integrato di software, progettato per uso iterativo in un ambiente multi utente; esso risulta costituito dai seguenti moduli:

- interfaccia grafica;
- routines per l'analisi idraulica;
- routines di memorizzazione e gestione dati;
- routines di graficizzazione e presentazione dei risultati.

Il programma può gestire un'intera rete di canali, un sistema ad albero o un singolo ramo; esso è in grado di modellare il moto permanente in regime di corrente lenta, rapida o mista.

La procedura utilizzata nei calcoli si basa sulla soluzione dell'equazione monodimensionale dell'energia, le perdite di carico valutate sono quelle distribuite (equazione di Manning) e quelle localizzate, causate dalla contrazione o espansione della vena liquida.

L'equazione della quantità di moto è utilizzata nei punti dove il profilo del pelo libero subisce brusche variazioni.

Utilizzando un procedimento iterativo, il software determina il profilo di moto permanente risolvendo la seguente equazione:

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

dove:

- Y_1, Y_2 altezze d'acqua nella sezione trasversale (m);
- Z_1, Z_2 quota del fondo nella sezione trasversale (m);
- V_1, V_2 velocità media nella sezione trasversale (m/s);
- α_1, α_2 coefficienti di Coriolis;
- g accelerazione di gravità (m/s²);
- h_e perdita di carico totale tra sezioni successive.

Le perdite di carico tra due sezioni comprendono sia la dissipazione localizzata che quella distribuita; l'equazione è la seguente:

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

con:

- L distanza tra le due sezioni contigue 1 e 2 (m);
- S_f pendenza della linea dell'energia;
- C coefficiente per le perdite di carico localizzate.

Per la determinazione del valore pendenza motrice S_f il programma calcola la conduttanza totale della sezione trasversale sommando la conduttanza di tutte le parti della sezione trasversale comprese tra due punti contigui. La conduttanza può essere così definita:

$$Q = K \sqrt{S_f}$$

dove:

- $K = \frac{1.486}{n} AR_h^{2/3}$ conduttanza della porzione di golena considerata;
- n coefficiente di Manning;
- A Area della sezione idrica (m²);
- R_h raggio idraulico (m).

Per la determinazione delle perdite di carico localizzate, il programma valuta la variazione del termine cinetico tra due sezioni contigue e lo moltiplica per il coefficiente di contrazione/espansione della vena liquida.

Dopo che il programma ha effettuato i calcoli dei profili di moto permanente è possibile visualizzare i risultati in forma grafica o tabellare.

4.1.2 Sezioni utilizzate

Per le simulazioni effettuate, si sono utilizzate 12 delle sezioni trasversali principali, di cui n° 6 poste a monte del ponte autostradale e n°6 a valle di questo. Tali sezioni sono elencate progressivamente con numeri che vanno dallo 04 al 15. Tutto il tratto è stato poi suddiviso in ulteriori sezioni ricavate tramite interpolazione e numerate dal 89 al 100.

4.1.3 Risultati delle simulazioni

Il programma HEC-RAS prevede l'inserimento di condizioni al contorno nelle sezioni di estremità di monte e di valle. A tal proposito, a monte e a valle, è stata assunta una pendenza di moto uniforme pari al 1,50 ‰.

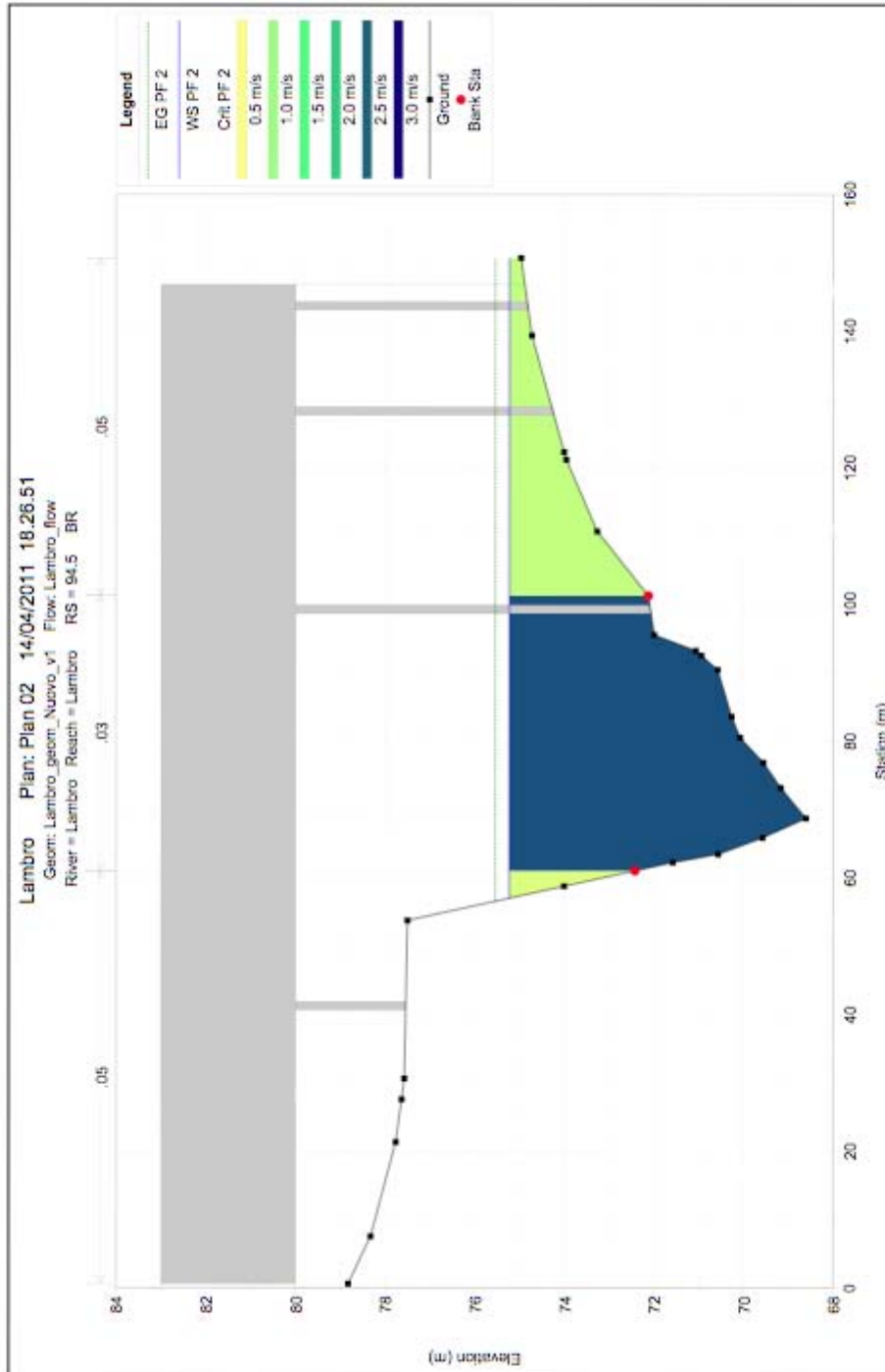
Come precedentemente accennato, si sono utilizzate per il calcolo del profilo liquido le portate Q_{10} e Q_{200} .

Di seguito si riportano in forma tabellare i risultati, con le seguenti grandezze:

- numero della sezione trasversale (River Sta);
- profili Q_{10} e Q_{200} (Profile);
- portata totale (Q Total);
- quota minima dell'alveo (Min Ch El);
- quota del livello idrico (W.S. Elev);
- quota della linea dell'energia (E.G. Elev);
- cadente dell'energia (E.G. Slope);
- velocità media della corrente (Vel Chl);
- area sondata (Flow Area);
- larghezza max sezione (Top Width);
- numero di Froude (Froude Chl).

HEC-RAS Plan: Plan.02 River: Lambro Reach: Lambro

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Lambro	100	PF 1	290.00	69.15	74.69		74.93	0.000681	2.29	178.52	94.92	0.35
Lambro	100	PF 2	550.00	69.15	76.13		76.42	0.000651	2.71	317.26	97.46	0.36
Lambro	99	PF 1	290.00	69.97	74.42		74.74	0.001161	2.56	137.37	86.01	0.44
Lambro	99	PF 2	550.00	69.97	75.92		76.26	0.000893	2.85	275.47	93.80	0.41
Lambro	98	PF 1	290.00	68.64	74.28		74.52	0.000660	2.31	178.41	94.43	0.35
Lambro	98	PF 2	550.00	68.64	75.79		76.07	0.000633	2.74	324.51	97.21	0.36
Lambro	97	PF 1	290.00	69.61	74.13		74.42	0.000986	2.42	130.31	63.67	0.41
Lambro	97	PF 2	550.00	69.61	75.55		75.97	0.000981	3.01	232.99	78.16	0.43
Lambro	96	PF 1	290.00	69.81	74.10		74.34	0.001004	2.18	136.71	49.72	0.40
Lambro	96	PF 2	550.00	69.81	75.49		75.88	0.000981	2.78	209.50	54.43	0.42
Lambro	95	PF 1	290.00	68.60	73.77		74.22	0.002071	2.96	97.85	33.70	0.56
Lambro	95	PF 2	550.00	68.60	74.94		75.74	0.002645	3.96	138.99	36.66	0.65
Lambro	94.9	PF 1	290.00	68.61	73.95	72.17	74.14	0.000774	1.96	151.44	55.04	0.35
Lambro	94.9	PF 2	550.00	68.61	75.27	73.19	75.59	0.000822	2.55	240.30	80.47	0.38
Lambro	94.5	Bridge										
Lambro	94	PF 1	290.00	68.61	73.86		74.06	0.000717	2.01	155.88	60.68	0.34
Lambro	94	PF 2	550.00	68.61	75.17		75.50	0.000806	2.64	256.85	93.58	0.38
Lambro	93	PF 1	290.00	68.58	73.61		73.97	0.001681	2.72	116.56	46.65	0.51
Lambro	93	PF 2	550.00	68.58	74.73		75.38	0.002007	3.68	185.69	93.46	0.58
Lambro	92	PF 1	290.00	69.44	73.53		73.79	0.001259	2.29	126.96	57.17	0.43
Lambro	92	PF 2	550.00	69.44	74.79		75.14	0.001145	2.75	243.16	96.47	0.44
Lambro	91	PF 1	290.00	68.27	73.49		73.66	0.000630	1.88	168.45	57.29	0.32
Lambro	91	PF 2	550.00	68.27	74.69		75.01	0.000804	2.58	239.51	62.36	0.38



Si nota che la portata di 550,00 mc/sec crea tiranti idraulici che esondano la banca golenale in riva sinistra.

La presenza delle pile del ponte non influisce tuttavia con il sul naturale deflusso dell'acqua.

4.1.4 Verifica delle pile in riva sinistra alveo

Noti i tiranti idrici in corrispondenza delle pile, utilizzando i valori relativi alle caratteristiche del moto, si procede al calcolo dello scalzamento.

Per il calcolo delle massime erosioni localizzate in corrispondenza delle pile, si applica la formula di Richardson et Al. (Colorado State University Equation - 1990) direttamente implementata in HEC-RAS:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \left[\frac{a}{y_1} \right]^{0.65} \cdot Fr_1^{0.43}$$

Essendo:

- y_s massima profondità di erosione [m];
- y_1 altezza della corrente a monte della pila [m];
- K_1 coefficiente correttivo dipendente dalla geometria della pila;
- K_2 coefficiente correttivo dipendente dall'angolo d'attacco della corrente;
- K_3 coefficiente correttivo dipendente dalla condizione del letto del fiume;
- K_4 coefficiente correttivo dipendente dalla granulometria dell'alveo;
- a larghezza della pila [m];
- Fr_1 Numero di Froude = $\frac{v_1}{\sqrt{g \cdot y_1}}$;
- v_1 velocità media del flusso a monte della pila [m/s].

Per pile con una geometria semplice e allineata con la corrente, la minima profondità di scalzamento calcolata con l'equazione, è limitata dalle seguenti formule:

$$y_s \leq 2.4a \quad \text{per } Fr < 0.8$$

$$y_s \leq 3.0a \quad \text{per } Fr > 0.8$$

Nel caso in esame la pila ha forma rettangolare con larghezza di 1.25 m, le teste della pila sono arrotondate ed è stata assunto un materiale d'alveo con caratteristiche $D_{50}=5\text{mm}$ e $D_{90}=20\text{mm}$.

I parametri di calcolo sono quindi:

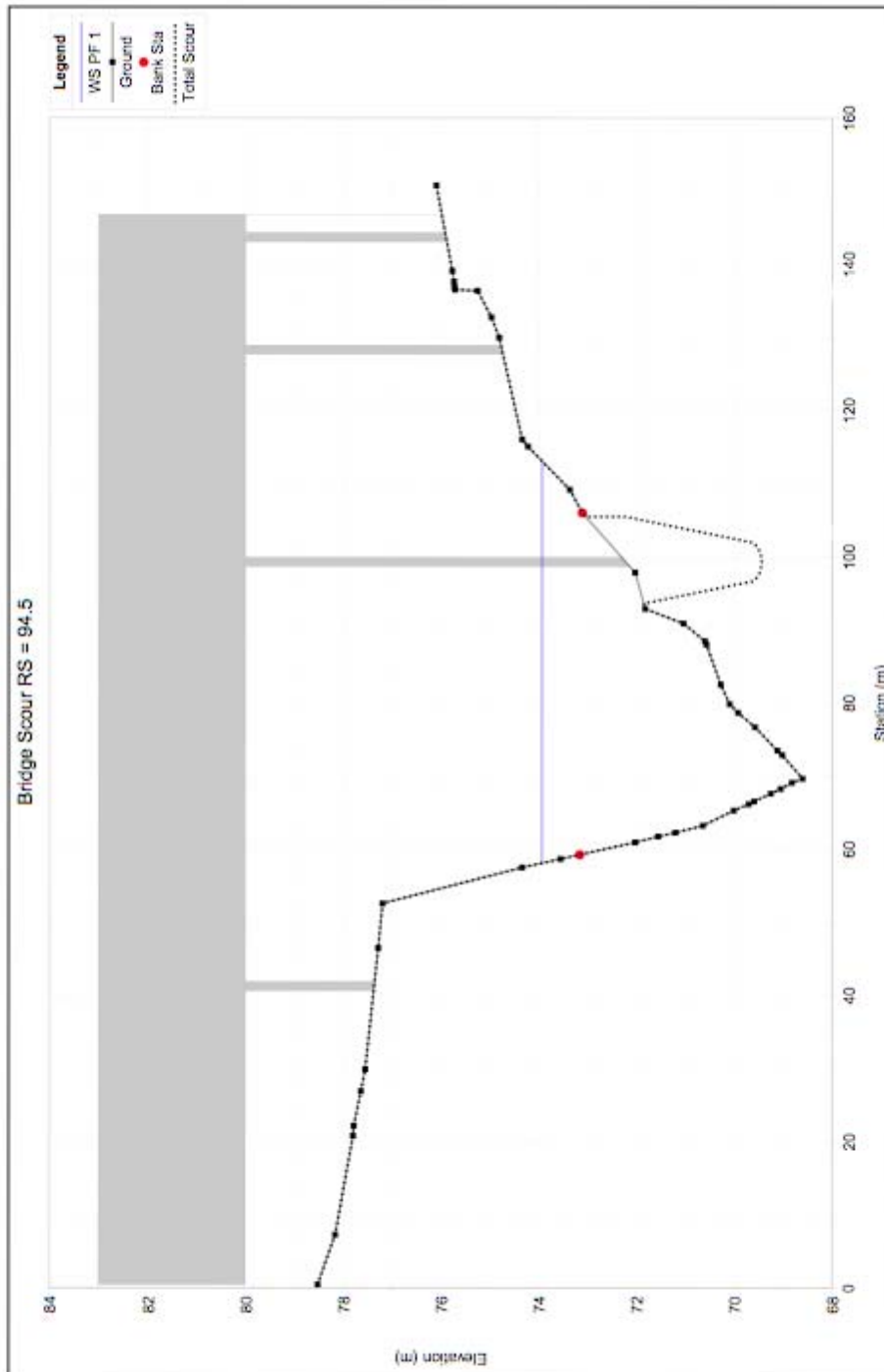
$$\alpha = 10^\circ, K_1 = 1.0, K_2 = 1.81, K_3 = 1.1, K_4 = 1.0.$$

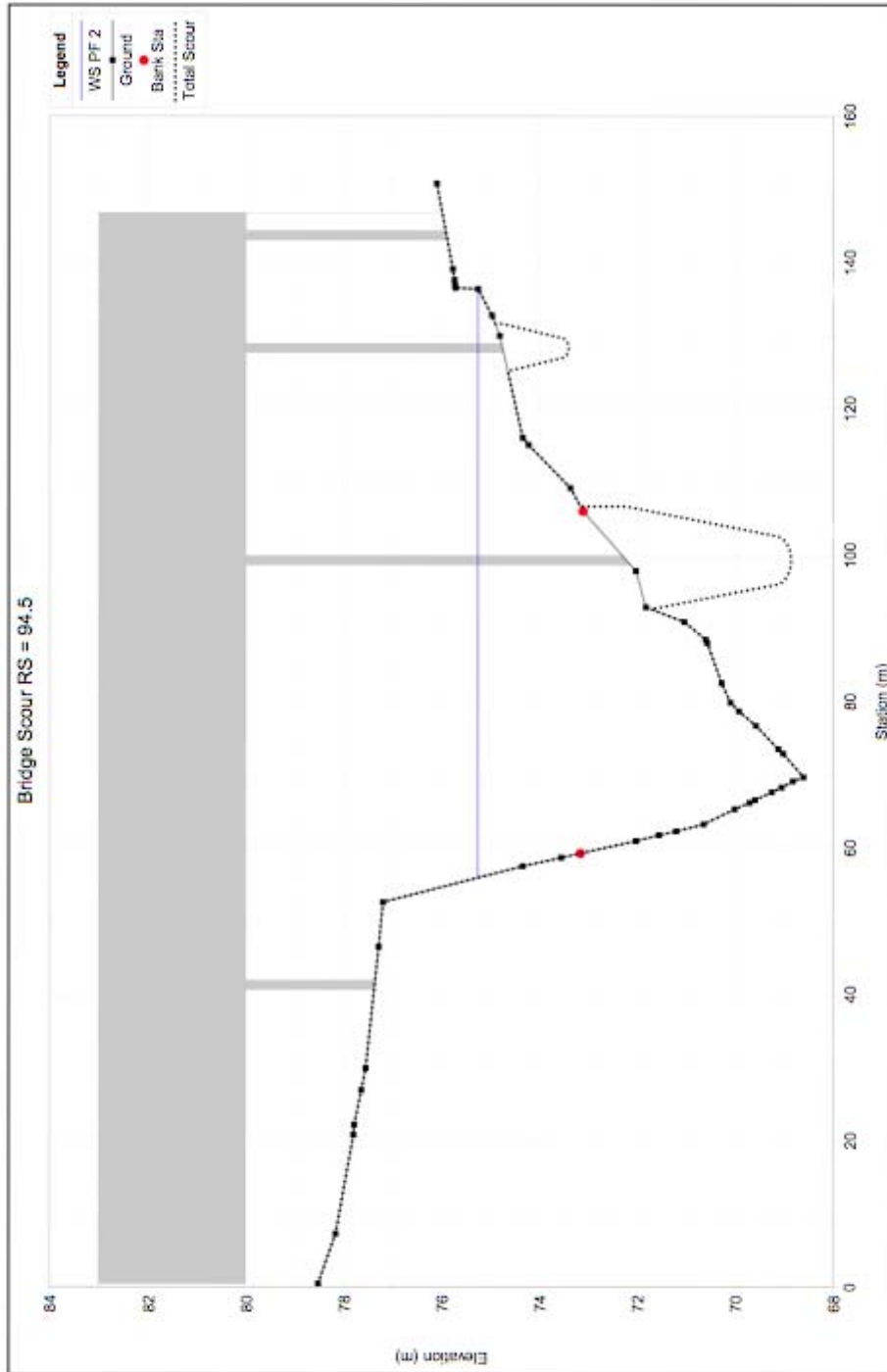
Con questi parametri, e fissando una corrente del fiume di tipo lento con $Fr < 0.8$, con Q_{10} lo scalzamento si verifica nella pila n°2 in sinistra alveo, pari a:

$$\text{- pila n° 2} \quad y_s = 2,78 \text{ m}$$

con Q_{200} lo scalzamento investe anche la pila n°3 sempre in sinistra alveo:

- pila n° 2 $y_s = 3,36$ m
- pila n° 3 $y_s = 1,35$ m





4.2 CALCOLO DI VERIFICA DELLE PORTATE MASSIME DEFLUIBILI IN CORRISPONDENZA DELLE OPERE D'ARTE DEL RETICOLO IDROGRAFICO SECONDARIO

Come già esposto, il reticolo idrografico risulta completamente regimato da monte ad opera dei vari Consorzi irrigui e/o di Bonifica.

L'intero sistema viene invasato nella stagione irrigua estiva, mentre in quella invernale è posto in asciutta, salvo il modesto rilascio di un minimum ecologico.

Ferme rimanendo le portate nominali e massime di cui ai par. 3.2.1 e 3.2.2 oggetto di regolazione, in questa sede viene effettuato un calcolo di verifica volto a valutare le portate massime effettivamente scaricabili dai manufatti prismatici dei vari canali. Per i calcoli, vengono utilizzate le note formule in moto uniforme:

$$Q = \chi A \sqrt{\mathfrak{R} j} = k \frac{A^{5/3}}{C^{2/3}} \sqrt{j}$$

Q portata di dimensionamento della canalizzazione (m^3/s);

$k = 1/n$ coefficiente di scabrezza di Strickler ($m^{1/3}/s$);

A area bagnata (m^2);

C contorno bagnato (m);

j pendenza media dell'opera (m/m);

$$\mathfrak{R} = \frac{A}{C}$$

raggio idraulico (m).

Per ottenere la velocità di percorrenza del singolo tratto basta dividere la portata Q per l'area bagnata A.

Per i casi in cui non è stato possibile determinare la pendenza media del corso d'acqua in corrispondenza delle opere d'arte è stata adottata a scopo cautelativo una pendenza minima pari allo 0,075 ‰ per le opere maggiori e 0,1 ‰ per quelle minori, negli altri casi in cui si aveva a disposizione il rilievo si è invece inserita la pendenza che di volta in volta si poteva desumere dalle sezioni rilevate. Il valore di scabrezza n è stato posto pari a 0.015 per i fondi in cls e 0.03 per i fondi in terra.

Si è proceduto in maniera differente a seconda si trattasse di opere maggiori o minori.

In realtà di alcune opere di dimensioni tali da poter essere considerate maggiori (superiori ai 2 m) sono state trattate alla stregua di opere minori perchè non per tutti si aveva a disposizione da parte del consorzio il valore di portata massima regimata.

Per le interferenze maggiori sono state fissate sezioni bagnate tali da mantenere un franco sotto gli impalcati non inferiore a 0,50 m e si è poi calcolato il coefficiente di sicurezza in relazione a quella che dal consorzio di competenza viene definita la portata massima regimata; per i manufatti minori invece si è calcolata la scala delle portate a sezione piena e con un riempimento dell'80%.

Per gli attraversamenti minori di sezione circolare si è fatto riferimento agli abachi contenuti nel Manuale dell'Ingegnere "Nuovo Colombo" dal quale si evince che si mantiene costante il rapporto:

$$\frac{n Q}{\sqrt{i} r^{8/3}}$$

dove n rappresenta la scabrezza i la pendenza e r il raggio della sezione.

Riempimento	A/r ²	R/r	c
1%	0.0053	0.0133	0.0003
2%	0.0150	0.0264	0.0013
3%	0.0275	0.0394	0.0032
4%	0.0422	0.0523	0.0059
5%	0.0587	0.0651	0.0095
6%	0.0770	0.0777	0.0140
7%	0.0967	0.0903	0.0195
8%	0.1177	0.1026	0.0258
9%	0.1400	0.1149	0.0331
10%	0.1635	0.1270	0.0413
15%	0.2955	0.1858	0.0962
20%	0.4473	0.2412	0.1733
25%	0.6142	0.2933	0.2711
30%	0.7927	0.3419	0.3876
35%	0.9799	0.3870	0.5204
40%	1.1735	0.4285	0.6669
45%	1.3711	0.4662	0.8243
50%	1.5708	0.5000	0.9895
55%	1.7705	0.5298	1.1592
60%	1.9681	0.5553	1.3296
65%	2.1617	0.5763	1.4970
70%	2.3489	0.5925	1.6570
75%	2.5274	0.6034	1.8047
80%	2.6943	0.6084	1.9345
85%	2.8461	0.6065	2.0393
90%	2.9781	0.5961	2.1093
95%	3.0829	0.5729	2.1265

Per le sezioni circolari si è quindi calcolata la portata massima defluibile semplicemente come:

$$Q = \frac{c \cdot \sqrt{i} \cdot r^{\frac{8}{3}}}{n}$$

mentre per le sezioni rettangolari valgono le formule del moto uniforme enunciate appena sopra.

Ricapitolando riportiamo nelle tabelle di seguito le verifiche suddivise appunto in Opere maggiori ed Opere minori:

Opere maggiori	Progressiva	Scabrezza K	Area bagnata A	Contorno bagnato C	Pendenza J	Velocità v	Portata Q	Q regimata consorzio	Coefficiente di sicurezza c
	[m]	[m ^{1/3} /s]	[mq]	[m]	[m/m]	[m/s]	[mc/s]	[mc/s]	
Cavo Lorini Marocco	13+262.44	33.33	13.70	23.05	0.630%	1.87	25.63	10.00	2.56
S38 Roggia Badia	17+176.35	66.67	3.75	5.50	0.100%	1.63	6.12	1.80	3.40
Cavo Sillaro	18+432.94	33.33	28.72	17.66	0.075%	1.26	36.26	10.00	3.63
Roggia Artesana S43	18+707.90	66.67	3.60	5.40	0.100%	1.61	5.79	1.20	4.83
Roggia Balzarina 45	19+892.08	66.67	6.60	7.40	0.109%	2.04	13.47	1.13	11.98
Roggia Urbana S47	20+075.08	66.67	5.55	6.70	0.939%	5.70	31.62	0.75	42.16
Roggia Dentina S48	20+237.00	66.67	3.60	5.40	0.211%	2.34	8.42	0.75	11.22
Roggia Vitalona S49	20+645.98	66.67	4.80	6.20	0.446%	3.75	18.02	1.50	12.01
Roggia Barbavara	21+327.10	33.33	5.99	7.94	0.126%	0.98	5.87	3.75	1.57

Opere minori	Progressiva	Scabrezza a K	Sezione A		Pendenza J %	Portata Q _{100%}	Portata Q _{80%}	Velocità V _{100%}	Velocità V _{80%}
			b/DN	h					
	[m]	[m ^{1/3} /s]	[mm]	[mm]	[m/m]	[mc/s]	[mc/s]	[m/s]	[m/s]
S03	5+161.28	66.7	2000	2100	0.10	6.83	5.19	1.63	1.24
S04	5+176.27	66.7	2000	2150	0.10	7.03	5.34	1.63	1.24
T01	5+446.35	66.7	1100		0.72	2.27	2.22	2.39	2.34
T02	5+467.54	66.7	1000		0.56	1.55	1.52	1.97	1.93
S05	6+029.18	66.7	2000	1500	0.49	9.99	7.50	3.33	2.50
T03	6+044.71	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T04	6+091.40	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T05	6+450.19	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T06	6+663.42	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T07	6+673.19	66.7	1000		0.33	1.19	1.16	1.52	1.48
T08	6+878.21	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T09	7+081.84	66.7	800		0.29	0.62	0.60	1.23	1.20
T10	7+177.88	66.7	800		0.25	0.57	0.56	1.14	1.11
T11	7+392.66	66.7	1000		0.98	2.06	2.01	2.62	2.57

Opere minori	Progressiva	Scabrezza a K	Sezione A		Pendenza J %	Portata Q _{100%}	Portata Q _{80%}	Velocità V _{100%}	Velocità V _{80%}
			b/DN	h					
	[m]	[m ^{1/3} /s]	[mm]	[mm]	[m/m]	[mc/s]	[mc/s]	[m/s]	[m/s]
T12	7+421.55	66.7	1000		1.74	2.74	2.68	3.49	3.42
S6bis	7+436.81	66.7	2000	1200	0.10	3.38	2.52	1.41	1.05
T14	7+546.04	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
S07	7+717.12	66.7	1000	1000	0.77	2.82	2.14	2.82	2.14
T15	7+836.02	66.7	1000		0.35	1.23	1.21	1.57	1.54
T16	7+981.63	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T17	8+070.37	66.7	1000		0.34	1.21	1.18	1.54	1.51
T18	8+116.62	66.7	1000		0.27	1.08	1.05	1.37	1.34
T19	8+204.97	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T20	8+289.51	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
S08	8+336.52	66.7	3000	1000	0.35	8.46	6.16	2.82	2.05
S09	8+364.32	66.7	1500	1000	0.10	1.80	1.34	1.20	0.90
S12	9+283.47	66.7	1800	1300	0.13	3.63	2.72	1.55	1.16
S13	9+608.95	66.7	1000	1500	0.25	2.61	2.00	1.74	1.33
S14	9+685.85	66.7	1000	1300	0.48	3.04	2.33	2.34	1.79
S15	9+913.37	66.7	1000	1400	1.42	5.71	4.38	4.08	3.13
S16	9+978.14	66.7	1000	1180		1.24	0.94	1.05	0.80
S17	10+184.36	66.7	1600	1400	0.02	1.44	1.09	0.64	0.48
S18	10+368.50	66.7	2000	1600	0.23	7.37	5.55	2.30	1.73
S19	10+517.31	66.7	1000	1630	0.10	1.81	1.39	1.11	0.86
S20	10+654.91	66.7	1500	2000	0.45	8.92	6.83	2.97	2.28
S21	10+694.98	66.7	1500	1300	0.07	2.10	1.59	1.08	0.81
S22	10+890.44	66.7	1000	1160		1.21	0.92	1.05	0.80
S23	10+950.56	66.7	1000	1270		2.36	1.81	1.86	1.42
T23	11+054.39	66.7	1100		1.24	2.99	2.92	3.15	3.08
T24	11+063.88	66.7	1000		0.07	0.55	0.54	0.70	0.69
T25	11+077.02	66.7	1000		0.89	1.96	1.91	2.49	2.44
T26	11+235.84	66.7	1100		0.49	1.88	1.84	1.98	1.94
S24	11+265.90	66.7	1500	2100	0.45	9.44	7.24	3.00	2.30
T27	11+385.08	66.7	1000		0.07	0.55	0.54	0.70	0.69
T28	11+620.41	66.7	1000		0.45	1.39	1.36	1.77	1.73
T29	11+930.49	66.7	1000		2.16	3.05	2.98	3.89	3.80
T31	12+245.11	66.7	1100		0.10	0.85	0.83	0.89	0.87
S25	12+280.55	66.7	1000	2000	0.66	5.87	4.54	2.93	2.27
S26	12+524.80	66.7	1400	2200	0.05	2.90	2.23	0.94	0.72
T32	12+851.12	66.7	1000		0.51	1.48	1.45	1.89	1.85
S27	13+134.68	66.7	2000	2500	0.27	13.94	10.65	2.79	2.13
T33	13+399.98	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
S30	13+563.02	66.7	1500	1500	0.45	6.30	4.78	2.80	2.12
T34	13+744.34	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71

Opere minori	Progressiva	Scabrezza a K	Sezione A		Pendenza J %	Portata Q _{100%}	Portata Q _{80%}	Velocità V _{100%}	Velocità V _{80%}
			b/DN	h					
	[m]	[m ^{1/3} /s]	[mm]	[mm]	[m/m]	[mc/s]	[mc/s]	[m/s]	[m/s]
S31	13+777.67	66.7	2100	1590	0.10	5.19	3.89	1.55	1.17
S32	14+129.65	66.7	1500	1750	0.10	3.60	2.75	1.37	1.05
T35	14+319.29	66.7	800		0.02	0.18	0.17	0.35	0.34
T36	14+497.10	66.7	800		0.48	0.79	0.78	1.58	1.54
S33	14+669.49	66.7	1800	2000	0.10	0.02	5.52	0.0042	1.53
S34	14+704.33	66.7	2300	1750	0.26	10.68	8.03	2.65	1.99
T38	15+184.28	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
S35	15+403.13	66.7	1500	1900	0.10	3.97	3.04	1.39	1.07
T39	15+629.81	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T40	15+814.06	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T41	15+840.30	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
S36	16+226.57	66.7	2000	2000	0.10	6.44	4.88	1.61	1.22
S37	16+516.08	66.7	2000	2490	0.10	8.38	6.40	1.68	1.29
T42	17+002.48	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
S39	17+319.37	66.7	2000	1500	0.10	4.50	3.38	1.50	1.13
S40	17+758.47	66.7	2000	2080	0.21	9.81	7.45	2.36	1.79
S41	17+908.35	66.7	2000	2700	0.02	4.47	3.42	0.83	0.63
T42bis	18+061.91	66.7	800		0.10	0.36	0.35	0.72	0.71
T43	18+121.85	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T44	18+307.70	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T45	19+407	66.7	1500		0.10	1.94	1.89	1.10	1.07
T46	19+518.29	66.7	1500		0.10	1.94	1.89	1.10	1.07
S44	19+602.27	66.7	2000	2000	0.10	6.44	4.88	1.61	1.22
T47	19+695.67	66.7	1500		0.10	1.94	1.89	1.10	1.07
T48	19+816.99	66.7	1500		0.10	1.94	1.89	1.10	1.07
S46	19+993.62	66.7	3000	2800	0.09	16.89	12.78	2.01	1.52
S50	20+802.71	66.7	3000	2300	0.10	13.64	10.25	1.98	1.49
T49	21+116.15	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82
T50	21+482.76	66.7	1000		0.10	0.66	0.64	0.84	0.82

4.3 CALCOLO DI VERIFICA DELLE PORTATE MASSIME SCARICABILI DALLE TOMBINATURE DELLE RETI IRRIGUE MINORI

Anche il reticolo idrografico minore delle reti irrigue private, derivando da quello secondario, è soggetto a regimazione stagionale.

I manufatti di attraversamento autostradale sono costituiti prevalentemente da tubazioni circolari in cemento e, in minor misura, da elementi scatolari in C.A..

Le tubazioni variano dal DN 800 mm al DN 1500 mm, gli scatolari dal 1000x800 mm al 2000x1500 mm.

Le portate irrigue sono tutte dell'ordine di 200,00 l/sec, essendo questo il corpo d'acqua utilizzato per l'irrigazione a scorrimento, in genere con un turno settimanale.

Il calcolo di verifica delle massime portate scaricabili può quindi essere riferito alle tombinature di minor diametro del DN 800 mm, allo scopo di valutare il minimo coefficiente di sicurezza dell'intero sistema idraulico.

Per questo calcolo viene utilizzata la nota formula Gauckler-Strickler che, combinata con la formula di Chézy, porta all'espressione:

$$Q = K_s \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times i^{\frac{1}{2}}$$

dove:

- Q portata, in mc/sec;
- K_s parametro di scabrezza, in $m^{1/3}/sec$;
- R raggio idraulico, in m;
- i pendenza, in ‰.

Assumendo per le tubazioni in cemento il valore di K_s pari a 85, una pendenza media dell'1,00 ‰ e inoltre applicando un gradiente d'età del 20 %, risulta che per un DN 800 mm la portata massima scaricabile a sezione piena è pari a 430,00 l/sec.

Il coefficiente di sicurezza risulta quindi già superiore a 2,0 nel caso delle tombinature di minor diametro.

5 INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA DEGLI ALVEI

In corrispondenza delle interferenze principali, secondarie e minori descritte, l'allargamento autostradale richiederà opere strutturali di ampliamento simmetrico diversificate come segue.

- A) Opere d'arte maggiori, costituite dagli attraversamenti con luce maggiore di 10,00 m o caratterizzati da impalcati di tipologia particolare.

Rientrano in questo gruppo:

- il ponte sul Fiume Lambro, di luce 147,70 m;
- il ponte sul Cavo Lorini-Marocco, di luce 8,00 m;
- il ponte sul Cavo Sillaro, di luce 9,00 m;
- il ponte sulla Roggia Barbavara, di luce 9,00 m.

- B) Opere d'arte minori, costituite dagli attraversamenti del restante reticolo idrografico secondario e minore di rogge e fossati.

Rientrano in questo gruppo:

- i ponticelli con travi;
- le tombinature con scatolari;
- le tombinature con tubazioni.

Tali opere comporteranno, di conseguenza, la realizzazione di interventi sugli alvei posti a monte e a valle, qualora la struttura degli stessi dovesse richiedere modifiche o adeguamenti.

5.1 INTERVENTI SULL'ALVEO DEL FIUME LAMBRO

Le modellazioni idrauliche inerenti al ponte sul Lambro, relativamente ai valori di piena adottati, non individuano variazioni significative rispetto alla situazione attuale.

Va comunque evidenziato che, col passare del tempo, l'alveo del Fiume Lambro si sta spostando verso la destra idraulica.

Si sono pertanto previste delle sistemazioni idrauliche per evitare che si instaurino fenomeni di erosione localizzata, dovuti alla velocizzazione della corrente, cercando di utilizzare le soluzioni meno impattanti dal punto di vista ambientale paesaggistico.

Ciò è possibile attraverso l'utilizzo di scogliere di massi sciolti, la cui pezzatura viene dimensionata per resistere alla spinta della corrente.

E' prevista inoltre la stesura di un geotessile filtro per evitare l'erosione al piede dei massi.

5.1.1 Metodo delle tensioni di trascinamento

Il calcolo della resistenza all'erosione di una sezione viene eseguito valutando gli sforzi tangenziali prodotti dalla corrente e controllando se il materiale che costituisce il letto del fiume può resistere senza subire danni permanenti.

Ai fini della valutazione degli effetti antiersivi è necessario che lo sforzo tangenziale effettivo prodotto dalla corrente su ciascun punto della sezione sia minore dello sforzo tangenziale massimo agente sulla superficie del canale.

Il metodo delle tensioni di trascinamento asserisce che, se lo sforzo tangenziale effettivo è maggiore dello sforzo tangenziale massimo tollerabile dalla superficie, avviene un trasporto dinamico delle sostanze colloidali e successivamente del materiale più grossolano.

L'erosione crea instabilità su un tratto di corso d'acqua e successivamente progredisce interessando aree più estese.

Gli sforzi tangenziali effettivi vengono calcolati utilizzando i criteri idraulici convenzionali, mentre gli sforzi tangenziali massimi tollerabili dipendono dal tipo di protezione e dalla loro resistenza alla corrente.

Lo sforzo tangenziale effettivo agente su ogni punto della superficie del canale viene calcolato usando la seguente formula:

$$\tau_b = k_1 k_2 \gamma_w y_i i_{fiume}$$

dove:

- k_1 : coefficiente di curvatura (maggiore di 1 solamente per punti situati su tratti pendenti esterni di argini curvi). In questo caso i valori suggeriti vengono riportati nella tabella sottoriportata;
- k_2 : coefficiente angolare che è pari ad 1 per punti situati su superfici orizzontali e a 0.75 per superfici inclinate;
- γ_w : peso specifico dell'acqua (10 kN/m³);
- y_i : livello dell'acqua nel punto considerato;
- i_{fiume} : pendenza dell'alveo lungo il tratto preso in esame.

Nel coefficiente k_1 viene considerato un incremento di sforzo tangenziale sulla sponda esterna di un tratto in curva come conseguenza dell'accelerazione centrifuga.

I valori del coefficiente k_1 sono riportati nella letteratura e dipendono dalla curvatura e dalla larghezza del corso d'acqua.

Coefficienti di curvatura k_1

Raggio di curvatura / Larghezza superficie libera	k_1 (coefficiente di curvatura)
8.0	1.2
6.0	1.4
4.5	1.6
3.2	1.8
2.0	2.0

A – Sponda in riva sinistra alveo

Applicando al caso in oggetto i valori sopra esposti, con un battente idrico di m 4,50 e una pendenza media pari al 1,50 ‰ si ottiene:

$$\tau_b = 2,00 \times 0,75 \times 10,00 \times 4,50 \times 0,0015 = 0,10125$$

La massima resistenza agli sforzi di taglio dell'opera in pietrame sciolto viene espressa in funzione del parametro di Shields:

$$\tau_c = K_s C^* (\gamma_s - \gamma_w) d_m$$

dove:

C^* : coefficiente di Shields (0.047);

γ_s : peso specifico delle rocce di riempimento (26 kN/m³);

γ_w : peso specifico dell'acqua (10 kN/m³);

d_m : diametro medio delle rocce di riempimento;

K_s : $\left(1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}\right)^{0.5}$ con θ angolo di inclinazione delle sponde e φ angolo di attrito dei massi, posto pari a 50°.

Quando gli argini hanno una pendenza superiore ai 35° ($\theta > 35^\circ$) si ha una limitazione nell'utilizzo del coefficiente K_s . In questo caso il fattore di riduzione viene assunto pari a 0.45.

Pertanto, considerando un diametro medio dei massi di scogliera pari a 0,45 m, si ottiene:

$$\tau_c = 0,45 \times 0,047 \times (26,00 - 10,00) \times 0,45 = 0,15228$$

determinando un fattore di sicurezza:

$$\frac{\tau_c}{\tau_b} = \frac{0,15228}{0,10125} = 1,50$$

B – Sponda in riva destra alveo

Per arrestare gli effetti erosivi in atto sulla sponda destra, sarà necessaria anche su questo lato del fiume una protezione a scogliera di massi sciolti.

Reiterando i calcoli delle formule precedenti:

$$\tau_b = 2,00 \times 0,75 \times 10,00 \times 7,00 \times 0,0015 = 0,1575$$

e, considerando un diametro medio dei massi pari a 0,70 m:

$$\tau_c = 0,45 \times 0,047 \times (26,00 - 10,00) \times 0,70 = 0,2368$$

con un coefficiente di sicurezza:

$$\frac{\tau_c}{\tau_b} = \frac{0,2368}{1,575} = 1,504$$

5.2 INTERVENTI SUGLI ALVEI DELLE OPERE D'ARTE SECONDARIE E MINORI

Per quanto riguarda il Cavo Lorini-Marocco, l'ampliamento di m 5,64 lato carreggiata sud, richiederà invece lo spostamento più a valle del manufatto di derivazione in riva sinistra, demolendo anche il relativo fabbricato.

Dovendosi, di conseguenza, spostare anche il sostegno centrale a due paratoie, andrà rifatto totalmente l'intero nodo idraulico, riproponendo quanto attualmente in essere più a valle.

L'ampliamento delle opere d'arte minori, di cui al punto B) precedente, nella maggior parte dei casi non richiederà particolari modifiche degli alvei originari a monte e a valle.

Tuttavia, nei casi in cui l'allargamento autostradale presenti entità tale da sovrapporsi ad alvei posti strettamente a ridosso del sedime, sarà necessario attuare lo spostamento degli stessi e/o la rettifica di alcune loro tratte.

Facendo riferimento alle Planimetrie in scala 1:2.000 allegate, tali interventi comporteranno l'escavazione di nuovi alvei secondo le seguenti tipologie principali.

- 1) Escavazione di alveo Tipo "A", a sezione trapezia, con fondo alveo di larghezza minima 1,50 m, profondità minima 1,50 m, sponde 2 su 3, protezione mediante idrosemina diretta o su geostuoia; si tratta della tipologia più diffusa.
- 2) Escavazione e rivestimento in C.A. di alveo Tipo "B", a sezione trapezia, con fondo alveo di larghezza minima 1,50 m, profondità minima 1,50 m, sponde 1 su 1, rivestimento in C.A. gettato in opera o in elementi prefabbricati su letto di posa in materiale arido costipato.
- 3) Escavazione e costruzione in C.A. di alveo Tipo "C", a sezione rettangolare, eseguito in opera o in elementi prefabbricati su letto di posa in materiale arido costipato.
- 4) Costruzione di manufatto in C.A. di raccordo Tipo "D" per il collegamento di tubazione e/o scatolare esistente a scatolare ribassato, eseguito in opera.
- 5) Costruzione di manufatto in C.A. di confluenza in fossato Tipo "E1" per scotolari esistenti, eseguito in opera.
- 6) Costruzione di manufatto in C.A. di confluenza in fossato Tipo "E2" per tubazioni esistenti, eseguito in opera.

In relazione alle tipologie sopra elencate, le Planimetrie allegate evidenziano le tratte dei fossati oggetto di rettifica, spostamento o ricalibratura, indicandone altresì l'andamento planimetrico.