

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTO DEFINITIVO

POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA
FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

LAMBRO MERIDIONALE

Relazione idrologica, idraulica e di compatibilità idraulica fiume Lambro Meridionale

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

N M O Z 1 0 D 2 6 R I I D 0 0 0 2 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	CONSORZIO INTEGRA	novembre 2018	M. Ventura	novembre 2018	S. Bonelli	novembre 2018	F. Sacchi
File: NM0Z10D26RII0002001A.docx								n. ab.

ITALFERR INFRASTRUTTURE NORD
Dott. Ing. Francesco Sacchi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
33172 Sez. A

Sommario

1. PREMESSA	2
2. DESCRIZIONE DEL BACINO DEL FIUME LAMBRO MERIDIONALE....	3
2.1. Cenni geologici.....	8
3. ANALISI IDROLOGICA	9
3.1. Portata di progetto	10
4. STUDIO IDRAULICO	15
5. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DATI DI INGRESSO.....	16
5.1. Risultati delle verifiche	18
6. RIPROFILATURA SEZIONE ALVEO.....	29
7. STIMA LIVELLO IDRICO OPERE PROVVISORIALI.....	32
8. ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA	34
8.1. Strumenti normativi.....	34
Norme di Attuazione – PAI Fiume PO	34
Manuale di Progettazione Ferroviaria.....	35
Le Norme Tecniche Costruttive 2008 (NTC).....	36
8.2. La compatibilità idraulica dell'infrastruttura	39

1. PREMESSA

Il progetto prevede il potenziamento infrastrutturale della linea ferroviaria Milano Genova nella tratta tra la stazione di Milano Rogoredo e la stazione di Pavia ed in particolare il Quadruplicamento della tratta tra la stazione di Milano Rogoredo e la stazione di Pieve Emanuele.

Dal punto di vista idraulico la tratta ferroviaria attraversa un territorio pressoché pianeggiante caratterizzato dalla presenza di una fitta rete di canali di bonifica ed irrigui.

In corrispondenza della progr. 9+966 è presente l'attraversamento del Lambro Meridionale per il quale si è fatto riferimento agli specifici studi svolti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po.

Il tracciato si sviluppa prevalentemente in direzione Nord – Sud e nel tratto iniziale fino alla progr. 3+700 le opere in progetto sono realizzate sull'esistente rilevato ferroviario già predisposto per il quadruplicamento della linea.

Fino alla progressiva 9+966 in cui la linea attraversa il Lambro Meridionale, la linea si sviluppa in affiancamento al rilevato esistente posizionandosi ad est di esso.

Dalla progr. 9+360 a fine intervento le opere in progetto si posizionano ad est del rilevato esistente contemplando pertanto anche una leggera variante della linea storica.

Nel proseguo si riportano le risultanze dello studio idrologico in conformità alle linee guida dell'Autorità di Bacino del Fiume Po

Relativamente alla stima delle portate di piena si riportano le risultanze degli studi di bacino per il Lambro Meridionale, in particolar modo si fa riferimento agli "Studi fattibilità

Per la rete dei canali irrigui è risultato di difficile determinazione una classificazione idrologica e pertanto nella relazione idraulica si procederà al loro dimensionamento in equivalenza idraulica agli attuali canali e tombini esistenti.

L'analisi idrologica nel seguito illustrata intende fornire gli elementi per valutare, in fase di progetto preliminare, l'influenza che il nuovo attraversamento ferroviario previsto in affiancamento a monte di quello esistente sul Fiume Lambro Meridionale, nel comune di Pieve Emanuele a circa 800m dalla stazione ferroviaria di Pieve Emanuele, potrà causare sulle caratteristiche idrodinamiche e morfologiche locali del corso d'acqua.

Si riporta di seguito un'immagine dell'attraversamento ferroviario esistente appartenente al tratto di linea Milano Rogoredo-Pavia.



Figura 1 - Ponte ferroviario esistente sul fiume Lambro Meridionale, comune di Pieve Emanuele

La scelta dei tempi di ritorno è stata effettuata in conformità a quanto previsto dalle indicazioni riportate nelle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Progetto di Piano Stralcio per l'assetto Idrogeologico (PAI) del bacino del Fiume Po (PAI Fiume Po), dalle Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 (NTC18) e dal Manuale di Progettazione Ferroviaria 2018.

Sarà inoltre svolto uno studio delle precipitazioni atmosferiche al fine di determinare la curva di possibilità pluviometrica per i tempi di ritorno pari a 20, 50, 100, 200 e 500 anni utile per il dimensionamento e la verifica degli elementi idraulici a servizio delle acque di piattaforma.

2. DESCRIZIONE DEL BACINO DEL FIUME LAMBRO MERIDIONALE

Il tracciato in progetto si sviluppa nel bacino idrografico del Lambro Meridionale facente parte del bacino del Fiume Lambro.

Originariamente il Lambro Meridionale costituiva semplicemente il ricettore delle portate di piena del Naviglio Grande mediante le paratoie di S. Cristoforo, mentre l'Olon, dopo aver attraversato il

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NMOZ	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

tratto cittadino di Milano terminava in Darsena. Successivamente, nel 1926, si è collegato l'Olonà al Lambro Meridionale, tramite un canale sotterraneo e un sifone sotto il Naviglio Grande.

Più a valle, a Conca Fallata, il Lambro Meridionale, in passato, attraversava il Naviglio Pavese per mezzo di un ponte (naviglio sopra), e riceveva poco più a valle il Lambretto che a sua volta aveva attraversato il Naviglio Pavese poco più a sud con un sifone.

Dopo il 1952 il Lambro Meridionale venne deviato nel Lambretto prima dell'attraversamento del Naviglio potenziando la botte a sifone che originariamente serviva solo il Lambretto, e il vecchio ramo che attraversava a nord venne trasformato in uno scaricatore di piena. Infine venne realizzato il Deviatore Olona che si innesta poco prima che il Lambro Meridionale, nel suo nuovo corso, attraversi con il sifone il Naviglio Pavese.

Il Deviatore Olona, che nasce al nodo di Vighignolo (dove poco prima convergono il Ramo Olona e il Ramo Seveso del CSNO), convoglia in parte, oltre alla portata dell'Olonà proveniente dalla Presa "Olonà 1", anche tutte quelle raccolte dal CSNO provenienti dallo scolmatore del Seveso di Palazzolo, dai Torrenti delle Groane, dallo scolmatore del Lura e dalla Presa "Olonà 2". Prima di immettersi nel Lambro Meridionale, il Deviatore Olona riceve anche i contributi dei depuratori di Pero, di Corsico e dalle reti fognarie di Milano.

Dal punto di vista generale il bacino del Lambro ha una superficie complessiva di circa 1980 km² (3% della superficie complessiva del bacino del Po) di cui solo il 5% in ambito montano.

Il bacino è caratterizzato da un reticolo idrografico complesso e articolato.

I numerosi corsi d'acqua naturali che gravitano a nord di Milano scorrono con direzione nord-sud e risultano interconnessi tramite una fitta rete di canali artificiali, realizzati sia a fini irrigui sia per la protezione dalle piene dei centri abitati.

Il principale corso d'acqua è il Lambro settentrionale, che scorre a est di Milano.

Le portate provenienti dal bacino di monte sono laminate dai laghi di Alserio e Pusiano che, a causa della loro non trascurabile superficie (circa 8 km²) rispetto a quella del bacino sotteso, esercitano una forte azione moderatrice sui fenomeni di piena.

Le piene del Lambro a Lambrugo sono pertanto originate dai deflussi provenienti dal bacino della Bevera, pari a 43,2 km².

Proseguendo verso valle, si riconoscono tre tratti caratterizzati dalla prevalenza di rilevanti apporti idrici rispetto al fenomeno di trasporto.

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</p>	<p>COMMESSA NM0Z</p>	<p>LOTTO 10</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0002001</p>	<p>REV. A</p>	<p>LAMBRO MERIDIONALE 5 di 39</p>

Nel primo tratto, compreso tra Peregallo e Sesto S. Giovanni, gli apporti provengono essenzialmente dai centri abitati di Monza e Sesto S. Giovanni.

Nel secondo tratto, compreso tra S. Donato Milanese e Melegnano, confluiscono in Lambro gli apporti del settore orientale di Milano e i contributi di due corsi d'acqua minori che provengono dall'interno di Milano, il cavo Redefossi e la roggia Vettabbia; a Melegnano confluisce in sinistra anche il canale Muzza.

Il terzo tratto, a valle di S. Angelo Lodigiano, in cui il Lambro meridionale (nome preso dall'Olona dopo l'attraversamento di Milano) confluisce nel Lambro settentrionale.

Procedendo verso ovest si incontrano nell'ordine il Seveso, il Lura, il Bozzente. Per ultimo si incontra il torrente Olona che risulta di fatto costituire parte integrante dello schema idraulico del Lambro per le ragioni accennate precedentemente.

Nella figura 2 si riporta l'ambito fisiografico del bacino del Lambro Meridionale.

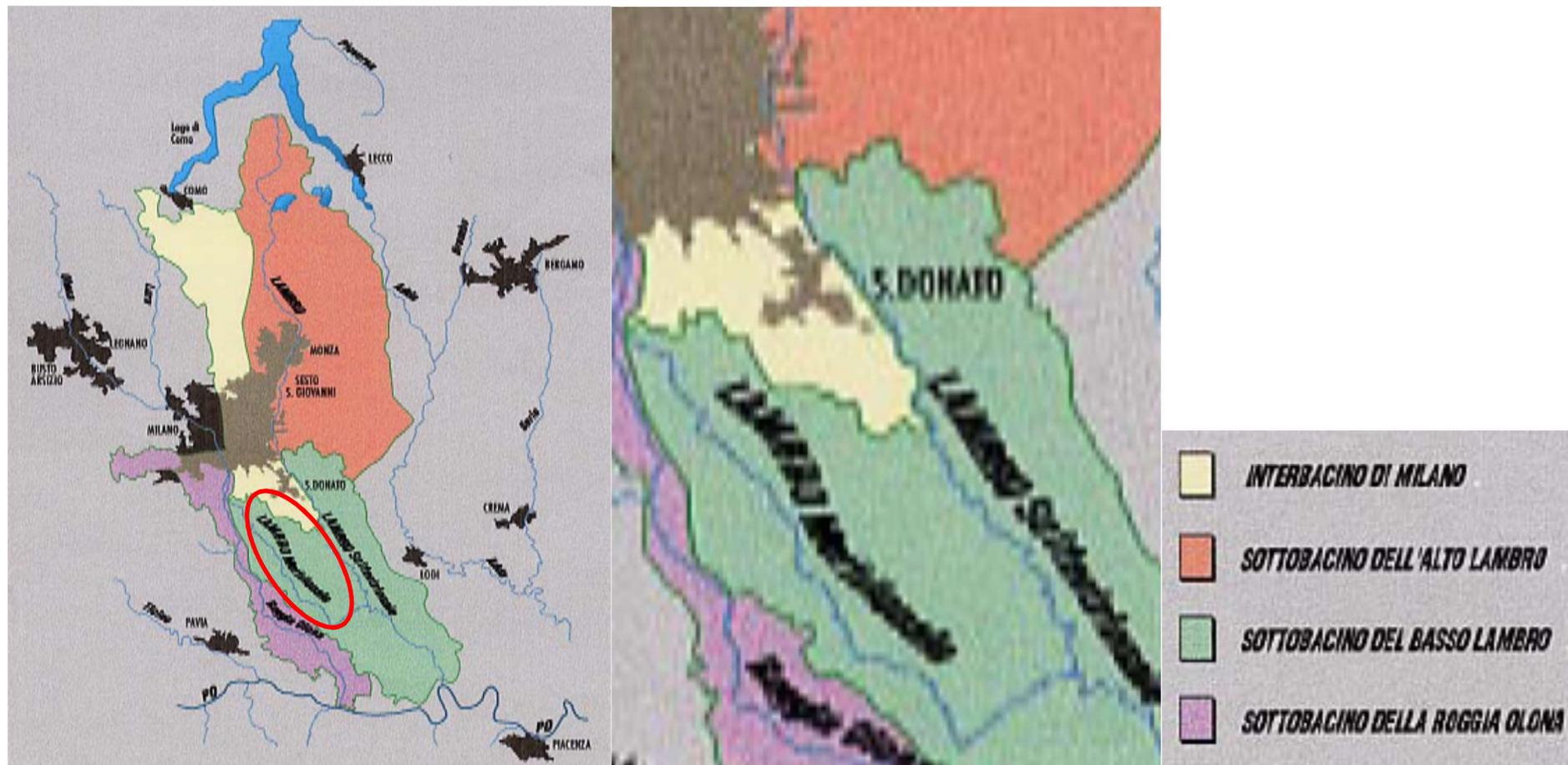


Figura 2 - Ambito fisiografico del fiume Lambro Meridionale

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</p>	<p>COMMESSA NMOZ</p>	<p>LOTTO 10</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0002001</p>	<p>REV. A</p>	<p>LAMBRO MERIDIONALE 7 di 39</p>

L'ambito Lambro-Olona presenta notevoli specificità che ne fanno un caso unico nel bacino del Po. In estrema sintesi le maggiori peculiarità possono essere così riassunte:

- i corsi d'acqua oggetto di studio, a nord di Milano, presentano tutti indistintamente una conformazione consolidata con capacità di deflusso progressivamente inferiore da monte verso valle. Come evidenziato dalle modellazioni eseguite (Seveso, Lambro, Lura, Groane, Bozzente, Olona) e come storicamente noto, tutti i corsi d'acqua dell'ambito, convergendo sulla zona urbana di Milano e dell'hinterland, trovano alvei che per diversi chilometri (10÷15) hanno capacità di smaltimento inadeguata alle esigenze con tempo di ritorno modesto. Tali limitazioni al deflusso derivano da una consolidata conformazione d'alveo che si è venuta sviluppando nei secoli fino ad oggi e che è l'insieme di vincoli posti dalla ridotta dimensione dell'alveo, dalla successione ininterrotta di ponti e della discontinuità del sistema difensivo nell'attraversamento delle zone urbanizzate. Su normali corsi d'acqua infatti è possibile trovare sezioni puntuali (es. ponti) che inducono limitazioni anche pesanti al deflusso. Tali sezioni tuttavia sono appunto puntuali e a valle delle stesse gli alvei riprendono caratteristiche di naturalità e di capacità di convogliamento simili e/o superiori a quelle di monte;
- l'urbanizzazione del territorio di fatto ha confinato i tratti terminali dei corsi d'acqua in ambiti o in sezioni chiuse il cui ampliamento non risulta proponibile e già era escluso nei lavori del Comitato Coordinatore delle Acque della Provincia di Milano del 1937;
- le sezioni di deflusso sono caratterizzate da numerosi manufatti di attraversamento e da un sistema difensivo spondale discontinuo e cresciuto, senza un criterio guida omogeneo, come conseguenza dei limiti imposti dalle urbanizzazioni;
- i contributi dei sistemi di allontanamento delle acque meteoriche provenienti dai centri urbani risultano in grado di saturare il sistema "naturale" per eventi che non superano in genere i 2 anni di tempo di ritorno
- i corsi d'acqua, nel percorso in Milano, non presentano sezioni a cielo aperto.

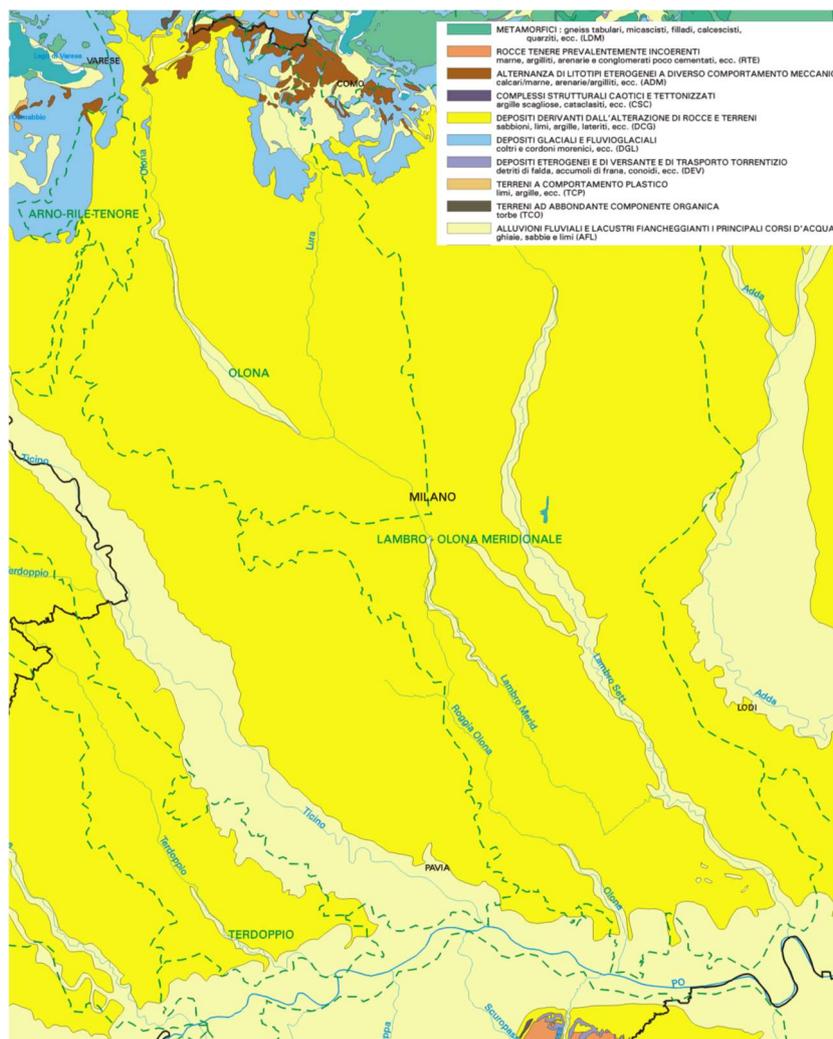
Le caratteristiche sopra elencate determinano di fatto anche una netta distinzione tra corsi d'acqua della zona a nord di Milano e corsi d'acqua della zona a sud. Mentre a nord infatti le problematiche risultano peculiari rispetto ad ogni altra zona del bacino padano, a sud i corsi d'acqua (Lambro, Lambro Meridionale e roggia Olona Inferiore) assumono comportamenti assimilabili ai corsi d'acqua

naturali del bacino con l'unica caratteristica di portate defluenti limitate rispetto alla capacità idrologica del bacino e dettata dai limiti prima citati nell'attraversamento di Milano.

In altri termini la ristrettezza delle sezioni a nord e la diffusione di tale limite su tutte le aste determina un deflusso a valle assai contenuto rispetto alle potenzialità dei bacini e quindi paradossalmente una salvaguardia delle zone attraversate dal reticolo.

2.1.Cenni geologici

Con riferimento alla carta geolitolitologica allegata al Piano di Assetto Idrologico (PAI) dell'Autorità di bacino del fiume PO, l'area di interesse si inserisce nella vasta pianura con terreni classificati come “*depositi derivanti dall'alterazione di riccie e terreni (sabbioni, limi, argille, ecc ...)*”.



 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NMOZ	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

3. ANALISI IDROLOGICA

Il notevole impatto che le opere interferenti e le aree di esondazione hanno nei confronti della formazione delle piene evidenziano come un'analisi delle portate lungo le aste principali del reticolo a nord di Milano attraverso l'utilizzo di modelli puramente idrologici appaia improponibile, ma occorre condurre una modellazione idrologico – idraulica che coniughi i modelli idrologici adottati per calcolare le onde di piena confluenti dai sottobacini contribuenti.

L'analisi idrologica del bacino in questione è stata condotta facendo riferimento ai seguenti documenti:

- *Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni – Art.7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n.49 del 23.02.2010 – Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale*
- *Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona.*

I valori delle portate di piena sono stati stimati mediante diverse metodologie, quali modelli idrologici afflussi-deflussi, regolarizzazioni statistiche delle serie storiche disponibili presso le stazioni di misura, metodi di regionalizzazione.

Tali valori sono stati definiti nelle sezioni di chiusura dei bacini di monte e di valle del corso d'acqua ed in alcune sezioni intermedie, laddove presenti confluenze, stazioni di misura, centri abitati significativi.

Le portate al colmo di piena sono state desunte dai documenti sopracitati le cui fonti utilizzate derivano da:

- studi propedeutici al PAI (1996 AdBPo);
- fasce Fluviali (1994-2001);
- studi di fattibilità (2004 AdBPo) che hanno aggiornato in parte il precedente quadro conoscitivo;
- ulteriori approfondimenti effettuati da Regioni, Province, AIPO e altri Enti nell'ambito delle attività di adeguamento della pianificazione territoriale ed urbanistica alle disposizioni del PAI e per la
- progettazione delle opere idrauliche di difesa previste nei programmi di attuazione del PAI;

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A	LAMBRO MERIDIONALE 10 di 39

Nello specifico si è fatto riferimento ai valori della sezione di chiusura 137 del fiume Lambro Meridionale nel comune di Pieve Emanuele in corrispondenza del ponte ferroviario.

3.1. Portata di progetto

Lo studio idraulico dell'attraversamento ferroviario necessita dei valori di portata massima per caratterizzare le simulazioni di deflusso ante operam, post operam.

Il fiume Lambro Meridionale rientra nell'elenco dei fiumi per i quali è prevista l'individuazione delle fasce fluviali ai sensi del D.P.C.M 24 luglio 1998.

Per i corsi d'acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali (nell'ambito del Piano di Stralcio delle Fasce Fluviali – PSFF e del PAI), i dati idrologici forniti dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po del Fiume Po costituiscono il riferimento per le procedure di valutazione della compatibilità idraulica delle opere pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B, che sono definite dalla *“Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B”*.

In particolare, in accordo con le prescrizioni della direttiva 2/99 aggiornata con la deliberazione 10/2006 dell'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po del Fiume Po il tempo di ritorno degli eventi di piena viene fissato in:

- $T_R=200$ anni per gli attraversamenti maggiori interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali; di diretta competenza dell'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po del Fiume Po
- $T_R=100$ anni per i corsi d'acqua minori non interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali.

La valutazione dei tempi di ritorno di riferimento per la determinazione delle portate di piena deve inoltre rispettare le prescrizioni tecniche previste dal Manuale di Progettazione ferroviaria dove i corsi d'acqua vengono distinti in principali e secondari.

In particolare sono stati definiti principali i corsi d'acqua con superficie del bacino imbrifero sotteso superiore ai 10 Km², mentre vengono definiti secondari i corsi d'acqua con bacino imbrifero sotteso compreso tra 1 e 10 Km².

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</p>	<p>COMMESSA NM0Z</p>	<p>LOTTO 10</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0002001</p>	<p>REV. A</p>	<p>LAMBRO MERIDIONALE 11 di 39</p>

In base alla classificazione precedente vengono fissati i seguenti tempi di ritorno di riferimento:

- $T_R = 200$ anni per gli attraversamenti secondari
- $T_R = 300$ anni per gli attraversamenti principali
-

Le NTC 2008 prevedono che *“Quando il ponte interessa un corso d’acqua naturale o artificiale [...] deve in ogni caso essere definita una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno T_r pari a 200 anni ($T_r=200$)”*.

I valori delle portate di progetto sono stati desunti dal *“Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 - Profili di piena dei corsi d’acqua del reticolo principale”* e dallo *“Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d’acqua naturali e artificiali all’interno dell’ambito idrografico di pianura Lambro – Olona”*.

Nel presente documento sono stati confrontati i valori di piena e scelti i più cautelativi.

Di seguito si riporta un estratto della tabella 4.5 dal *“Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 - Profili di piena dei corsi d’acqua del reticolo principale”* in cui sono definite le portate del Fiume Lambro Meridionale nel tratto nella sezione di chiusura 137 in località Pieve Emanuele.



Tab. 5.17: profili di piena per il fiume Lambro Meridionale

(Le lettere "m" e "v" tra parentesi indicano che la sezione è in corrispondenza di un'opera di attraversamento o di un'opera trasversale e pertanto è ripetuta, nel nome e nella progressiva, per indicarne il livello rispettivamente a monte e a valle)

Sez.	Progr. (km)	T = 10 anni	T = 100 anni	T = 500 anni	Sez.	Progr. (km)	T = 10 anni	T = 100 anni	T = 500 anni
		Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)			Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)
LA 147	11.852	91.36	91.72	91.79	LA 59	33.920	69.68	70.29	70.65
LA 146 (m)	12.208	91.14	91.52	91.61	LA 57	34.265	69.52	70.12	70.49
LA 146 (v)	12.208	91.11	91.44	91.52	LA 55	34.740	69.25	69.87	70.23
LA 145	12.475	90.88	91.26	91.40	LA 52.1	35.558	68.92	69.54	69.90
LA 144	12.768	90.73	91.15	91.34	LA 51	36.039	68.72	69.38	69.75
LA 143	13.248	90.57	91.00	91.25	LA 49.1	36.249	68.67	69.32	69.69
LA 142	13.433	90.49	90.94	91.19	LA 48	36.724	68.53	69.20	69.58
LA 141	13.688	90.23	90.69	90.95	LA 47	36.993	68.35	69.00	69.39
LA 140	13.792	90.16	90.65	90.93	LA 45.1	37.462	68.21	68.87	69.26
LA 139 (m)	14.135	89.91	90.43	90.71	LA 44	37.800	68.09	68.75	69.13
LA 139 (v)	14.135	89.87	90.32	90.59	LA 41.1	38.522	67.80	68.47	68.85
LA 137 (m)	14.441	89.67	90.11	90.37	LA 40	38.956	67.61	68.29	68.69
LA 137 (v)	14.441	89.62	90.03	90.27	LA 39	39.219	67.53	68.23	68.62
LA 133	15.512	88.57	88.95	89.17	LA 37	39.686	67.36	68.07	68.47

Tabella 1: Portate di piena del Lambro Meridionale

Nel documento sopracitato appartenente al PRGA le portate di progetto indicate in corrispondenza della sezione 146 sul ponte stradale a servizio della SP28 nel comune di Triulzi sono:

T_R (anni)	Q_{PGRA} (m ³ /s)
500	160
100	150
10	110

Nello "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona" nella "Relazione descrittiva e di analisi delle attività" elaborato 5.2.2/2/1R/LM le portate di progetto del Lambro Meridionale nelle varie sezioni di chiusura notevoli sono:

Sez.	Comune	Localizzazione	T 10		T 100		T 500	
			Portata (mc/s)	Livello (m)	Portata (mc/s)	Livello (m)	Portata (mc/s)	Livello (m)
LM_170	Milano	Conca Fallata	98.0	105.6	133.9	106.0	137.7	106.1
LM_159	Rozzano	Traversa Quinto Stampi	102.3	99.7	138.8	100.3	144.0	100.3
LM_154	Rozzano	Ponteseosto	103.2	96.9	140.0	97.3	145.7	97.5
LM_146	Pieve Emanuele	SP. 28 Dosso del Moro	89.2	91.1	102.0	91.4	105.3	91.6
LM_137	Locate Triulzi	Attraversamento FS MI-PV	93.1	89.7	126.2	90.1	148.7	90.4
LM_124	Locate Triulzi	Traversa di Gnignano	93.5	85.8	127.2	86.2	150.2	86.4
LM_109	Landriano	Ponte Via Rimembranze	94.0	78.7	128.1	79.4	152.9	79.5
LM_88.1	Torrevecchia Pia	SP. 9 Zibido al Lambro	93.8	75.6	128.6	76.1	154.0	76.4
LM_68	Marzano	Castel Lambro	93.5	71.3	129.1	71.9	154.5	72.3
LM_30	Villanterio	Piazza Castello	90.2	66.8	127.7	67.5	153.5	67.9
LM_8	S. Angelo Lodigiano	Traversa ENEL	92.5	61.8	131.7	62.1	158.9	62.4

Il documento prodotto dall'Autorità di bacino del Fiume Po riporta nella sezione interessata LM137 le seguenti portate:

T _R (anni)	Q _{studi di fattibilità} (m ³ /s)
500	142.9
100	126.5
10	93.1

Comparando il valore delle portate stimate nei diversi studi citati, anche se il PGRA riporta un valore di portata riferito al ponte che sta alla sezione 146, poiché il progetto è stato condotto con riferimento alla condizione più sfavorevole si prenderanno in esame i valori massimi desunti dal "Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 - Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale".

T _R (anni)	Q _{PGRA} (m ³ /s)	Q _{studi di fattibilità} (m ³ /s)
500	160	142.9
100	150	126.5
10	110	93.1

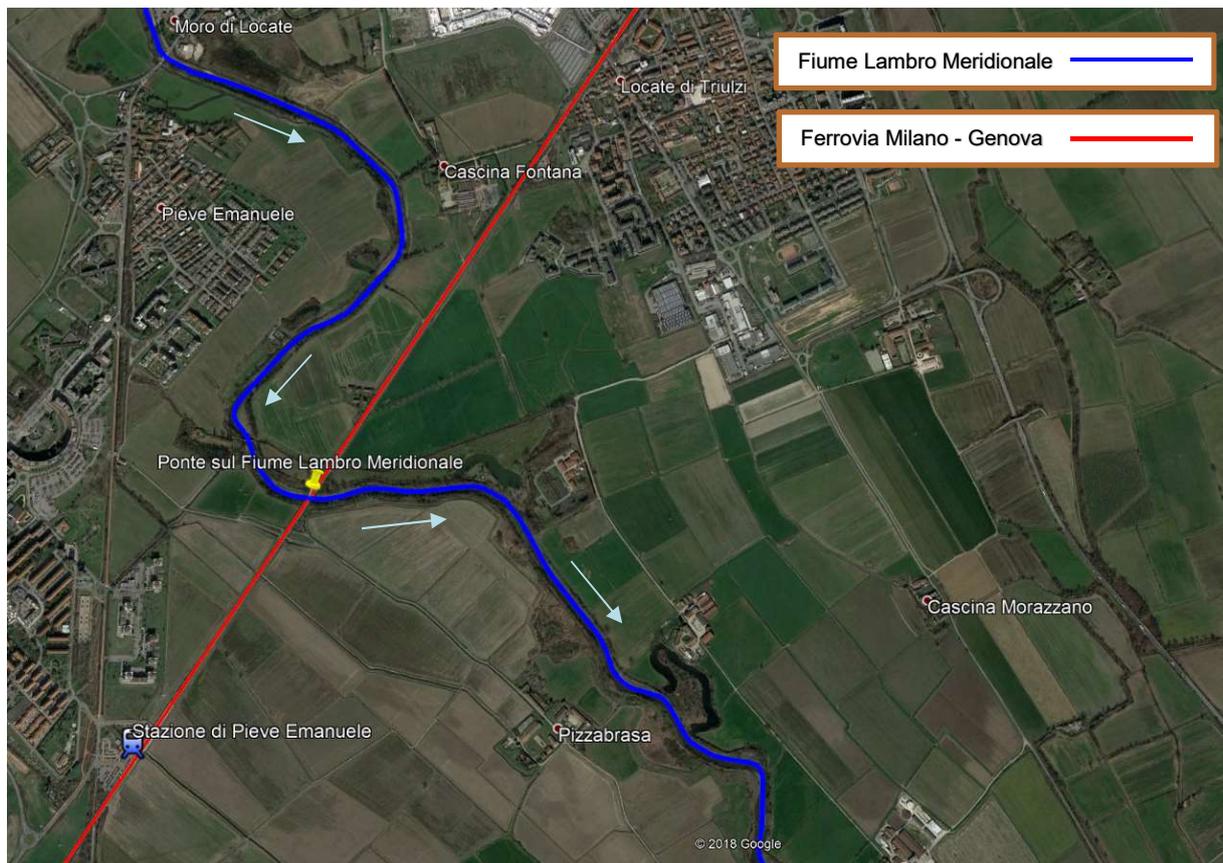
	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A	LAMBRO MERIDIONALE 14 di 39

Per la modellazione idraulica, non disponendo di valori di portata relativi agli eventi duecentennale e trecentennale, e poiché le portate $Q_{100} = 150 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{500} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$ differiscono di poco, si farà riferimento ad una portata al colmo di progetto rispettivamente pari a $Q_{500} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sulla base di quanto esposto sopra, al fine di rispettare sia le prescrizioni emanate dall'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po del Fiume Po, sia le prescrizioni ferroviarie che le NTC 2008 le verifiche idrauliche sono state condotte sia con riferimento ad un evento di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni.

4. STUDIO IDRAULICO

L'analisi idraulica nel seguito illustrata intende fornire gli elementi per valutare l'influenza che il nuovo attraversamento ferroviario previsto in affiancamento a quello esistente, della linea ferroviaria Milano Genova nella tratta tra la stazione di Milano Rogoredo e Pieve Emanuele, nel comune di Locate Triulzi a circa 1 km a nord dalla stazione ferroviaria di Pieve Emanuele, potrà causare sulle caratteristiche idrodinamiche e morfologiche locali del Fiume Lambro Meridionale.



Intersezione linea ferroviaria MI-GE con il Fiume Lambro Meridionale

Lo studio riguarda le variazioni del livello idrometrico rispetto all'attuale configurazione d'alveo a seguito dell'interferenza prodotta dall'inserimento a valle del nuovo attraversamento.

L'analisi effettuata sul fiume Lambro Meridionale è mirata a soddisfare eventi di piena gravosi, convenzionalmente fissati con probabilità di superamento dello 0.50%, ossia con tempo di ritorno di 200 anni secondo quanto previsto dalle Norme Tecniche di Attuazione (NTA) del Progetto di Piano

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</p>	<p>COMMESSA NMOZ</p>	<p>LOTTO 10</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0002001</p>	<p>REV. A</p>	<p>LAMBRO MERIDIONALE 16 di 39</p>

Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino del Fiume Po (PAI) e dalle Norme Tecniche Costruttive 2008 (NTC).

Nello studio idraulico è previsto il calcolo del profilo in moto permanente per un valore di piena corrispondente al tempo di ritorno $T_r=500$ anni in ottemperanza a quanto previsto dal Manuale di Progettazione ferroviaria 2018 (MdP).

Le attività di indagine vengono articolate come segue:

- Studio idraulico per il calcolo dei livelli idrometrici in assenza del previsto attraversamento in occasione della piena cinquecentennale.
- Studio idraulico per il calcolo dei livelli idrometrici in presenza del previsto attraversamento in occasione della piena cinquecentennale .

Nel seguito della presente relazione ciascuna delle attività menzionate viene documentata in un apposito capitolo.

Le valutazioni si avvalgono di modelli matematici e numerici che sfruttano le informazioni idrologiche, topografiche e tutti i parametri fisici (es. scabrezza d'alveo). In particolare, le analisi idrauliche vengono condotte mediante un modello numerico alle differenze finite, HEC-RAS dell'U.S. Army Corps of Engineers. La documentazione delle attività di indagine comprende la descrizione dei dati disponibili, le metodologie utilizzate e i principali risultati conseguiti; laddove esiste un margine non eliminabile di indeterminazione, è stata svolta un'analisi di sensitività per quantificare l'incidenza di tale indeterminazione sui fenomeni di interesse.

5. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E DATI DI INGRESSO

L'attraversamento del fiume Lambro Meridionale a servizio della nuova linea ferroviaria Milano - Genova in affiancamento a quella storica è previsto a valle dell'esistente.

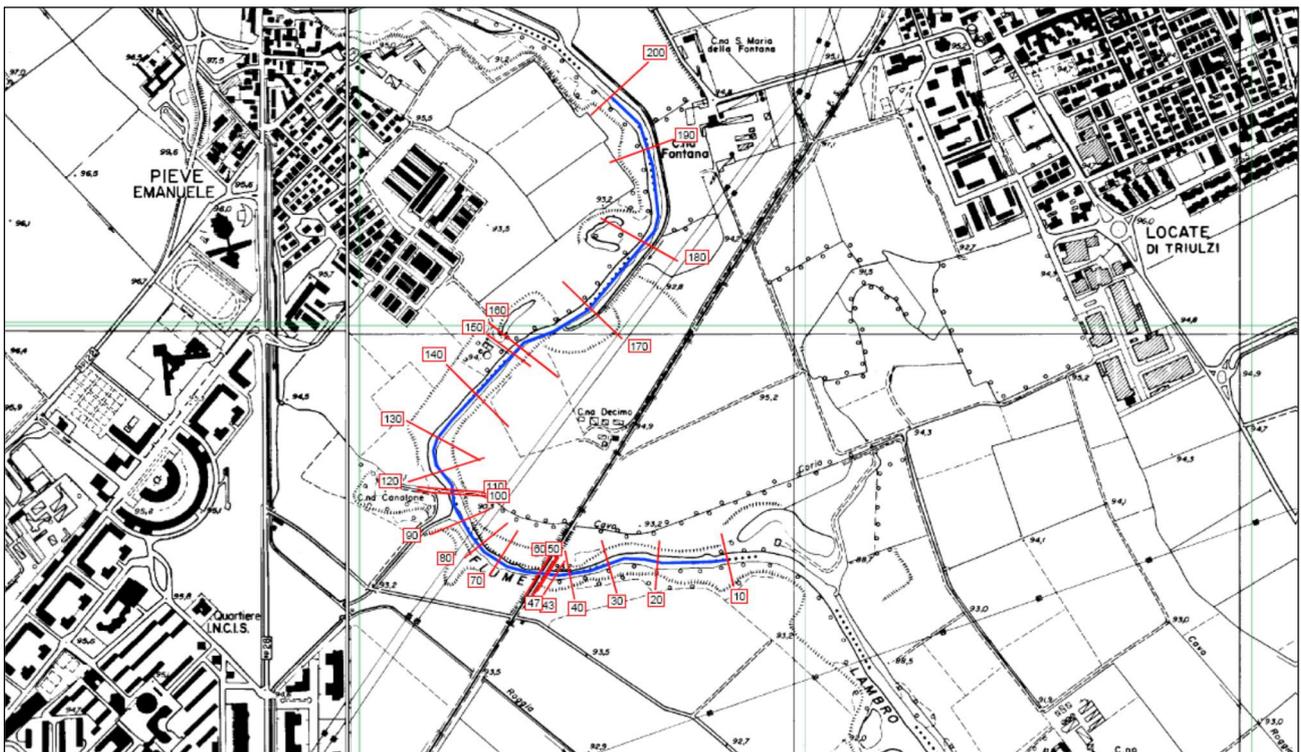
La struttura presente è costituita da una campata unica ad arco in muratura lunga circa 18m con le spalle a filo dell'alvo attivo.

Il nuovo ponte ferroviario previsto con luce superiore all'attuale sarà in acciaio con travi reticolari a valle dell'esistente con un'unica campata pari a $L=40m$ senza pile alcune minimizzando gli effetti legati alla perturbazione del profilo idrico determinate dall'inserimento della nuova installazione.

La livelletta ferroviaria non è strettamente legata a quella del ponte esistente a monte dunque al fine di ottenere una struttura che consenta di garantire i franchi richiesti dalle prescrizioni dalle NTA dell'ADBPO, dal MdP e dalle NTC, il progetto prevede un viadotto di scavalco del fiume con campate di luci maggiori di quelle del ponte storico e con quota dell'intradosso del nuovo impalcato superiore a quella esistente.

La descrizione geometrica del corso d'acqua è supportata da una campagna di rilievi e di sopralluoghi della zona in esame effettuata appositamente per il progetto in esame.

Nella figura seguente è riportata la planimetria dell'area indagata con l'ubicazione delle sezioni trasversali utilizzate ai fini della modellazione idraulica.



Stralcio planimetrico con l'ubicazione delle sezioni di calcolo

Le analisi idrauliche sono state condotte mediante un modello numerico alle differenze finite, brevemente descritto al paragrafo seguente. Il codice di calcolo utilizzato è HEC-RAS ver 5.0.5 dell'U.S. Army Corps of Engineers. Si tratta di uno strumento di applicabilità molto ampia, che ha conosciuto un'adozione molto diffusa. Il modello ha diverse componenti che possono essere utilmente utilizzate nei calcoli idraulici; nel presente studio è stato impiegato l'algoritmo di calcolo idraulico per la determinazione delle condizioni di deflusso in regime permanente monodimensionale,

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NMOZ	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

assumendo a favore di sicurezza come costante la portata istantanea al colmo calcolata nello studio idrologico per il tempo di ritorno:

- $T_r = 500$ anni con $Q_{500} = 160 \text{ m}^3/\text{s}$;

Oltre alle sollecitazioni idrauliche e alla descrizione macro-geometrica del corso d'acqua, ulteriori elementi conoscitivi che le elaborazioni numeriche richiedono sono rappresentati dalle condizioni idrauliche al contorno (atteso il carattere sub-critico della corrente in esame) e dalla descrizione micro-geometrica (scabrezza) dell'alveo.

Data la conformazione del corso d'acqua in esame, che nel tratto oggetto di indagine si presenta molto simile ad un canale, la condizione al contorno individuata risulta quella di moto uniforme a valle (essendo il Lambro Meridionale caratterizzato da un alveo a debole pendenza).

Le condizioni al contorno nei tratti di inizio e fine simulazione sono desunte dai rilievi effettuati; in particolare si adotta a monte una pendenza di moto uniforme pari a $p = 0.04\%$ e a valle $p = 0.027\%$.

La Direttiva dell'Autorità di Bacino del Po riporta la tabella con i coefficienti di scabrezza, desunte dal libro "Open Channel Hydraulics" di Ven Te Chow, nelle quali i valori dei coefficienti di Strickler pari a 25 (Manning = 0.04) per l'alveo e pari a 16 (Manning = 0.06) per la golena risultano essere tra i più cautelativi sia in alveo che in golena.

Per la definizione della scabrezza e la calibrazione del modello vengono adottati valori tali affinché il pelo libero delle sezioni di studio rilevate siano compatibili con quello indicato nel "Piano per la valutazione e la gestione del rischio di alluvioni - Art. 7 della Direttiva 2007/60/CE e del D.lgs. n. 49 del 23.02.2010 - Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale".

Per la simulazione corrente viene assunto un valore di scabrezza medio secondo Manning n pari a $0.0375 \text{ s}\cdot\text{m}^{1/3}$ per l'alveo e pari a $0.0475 \text{ s}\cdot\text{m}^{1/3}$ per le aree golenali coerentemente con quanto indicato dall'Autorità di bacino.

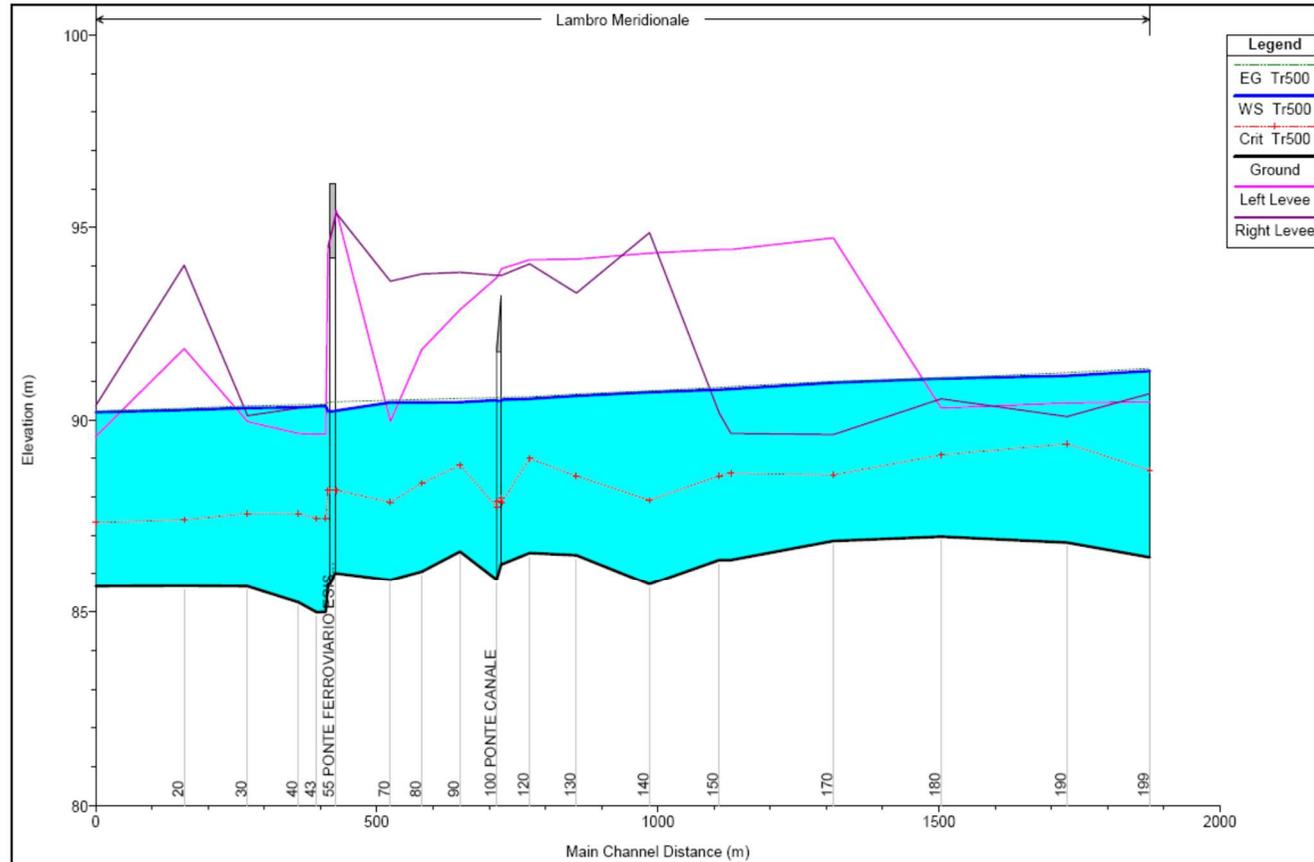
5.1. Risultati delle verifiche

Si riportano di seguito i profili e i tabulati idraulici per le per la portata cinquecentennale e con la condizione al contorno di valle imposta dall'altezza di moto uniforme.

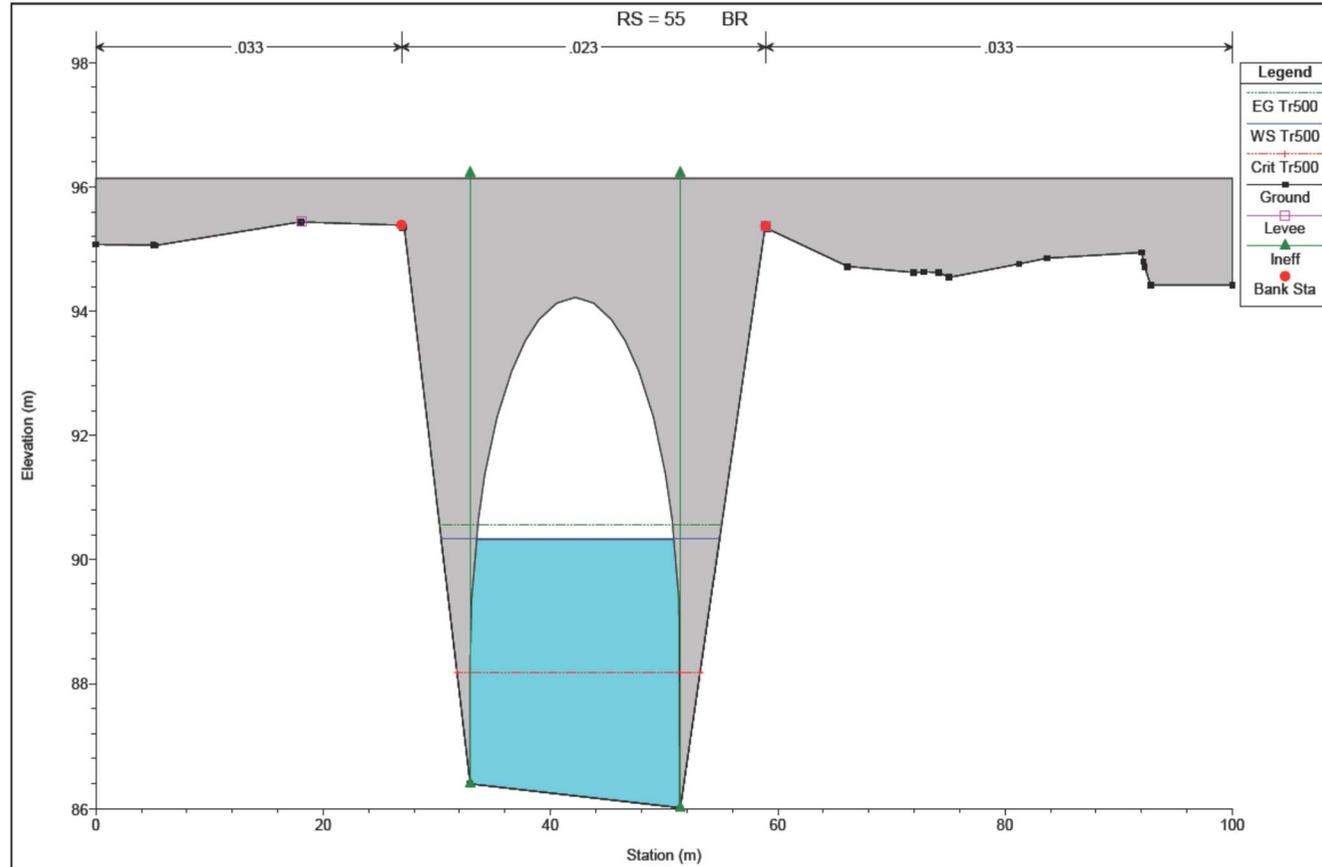
PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA
FASE 1 – QUADRUPLCAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

**RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI
COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO
MERIDIONALE**

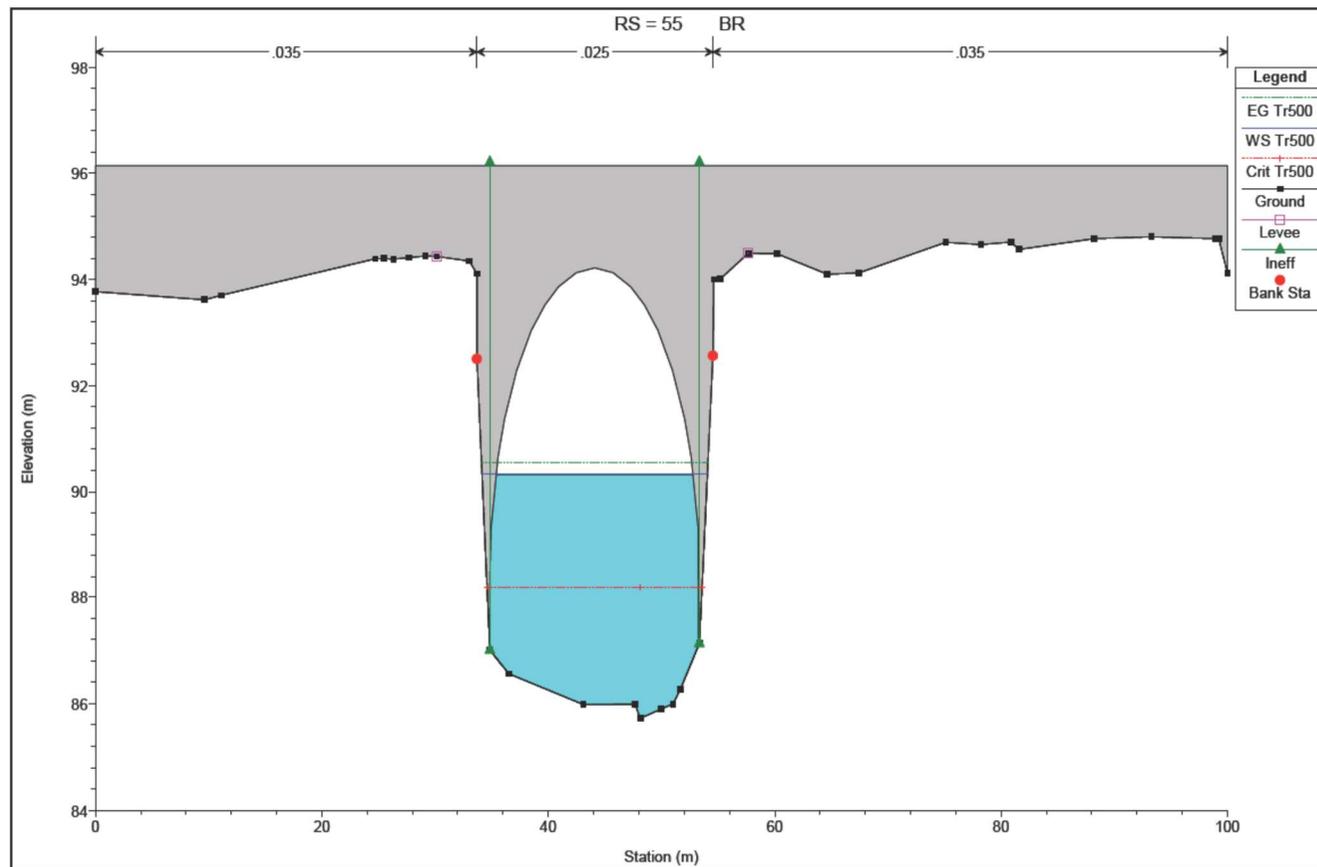
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	LAMBRO MERIDIONALE
NM0Z	10	D26	RIID0002001	A	19 di 39



Profilo simulazione Q_{500} ante operam



Sezione di monte attraversamento ferroviario esistente - Q_{500} ante operam



Sezione di valle attraversamento ferroviario esistente - Q_{500} ante operam

PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA
FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

**RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI
COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO
MERIDIONALE**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	LAMBRO MERIDIONALE
NM0Z	10	D26	RIID0002001	A	22 di 39

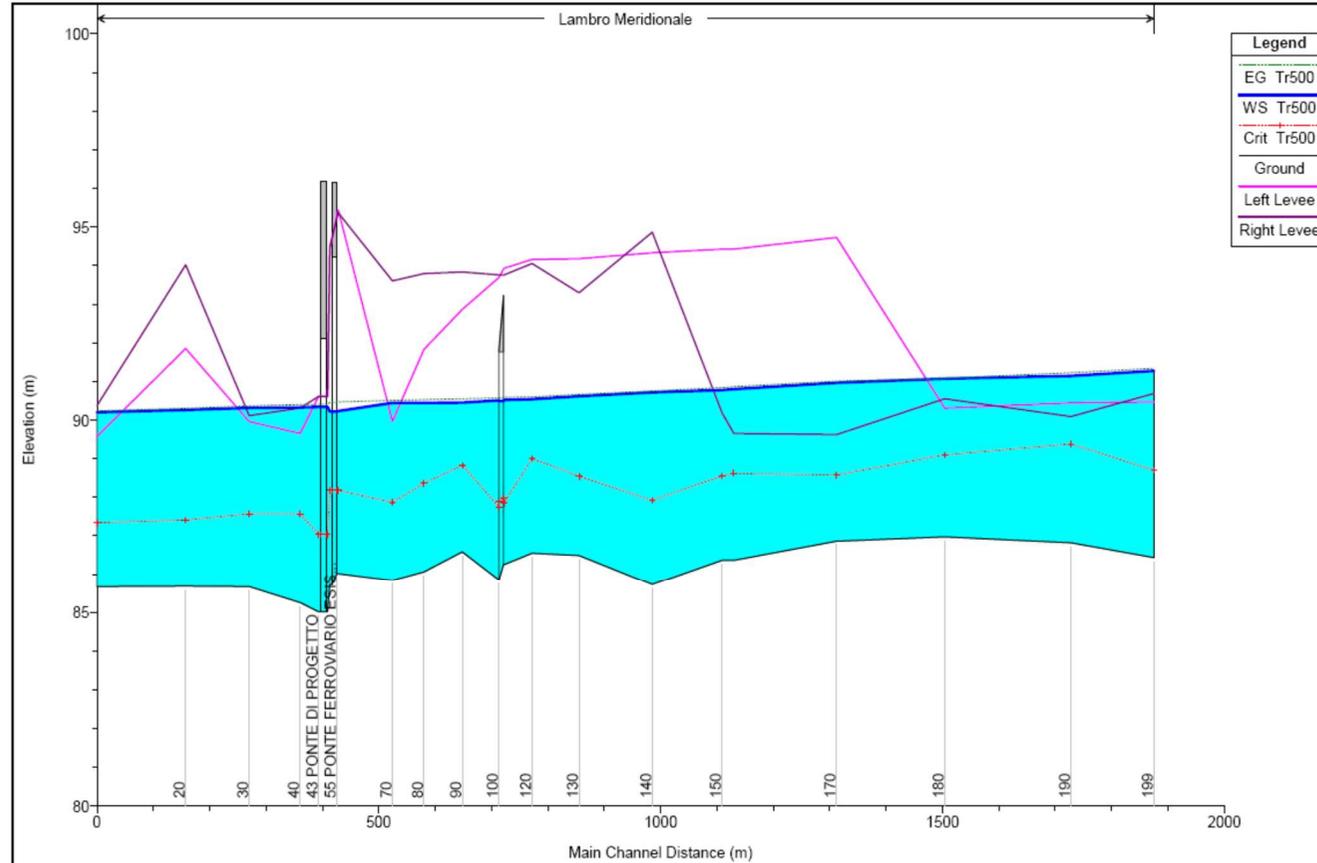
Tabulato variabili idrauliche Q₅₀₀ ante operam

Sezione	Tirante idraulico(m)	Quota minima(m)	Quota livello idrico(m)	Carico totale(m)	Pendenza motrice	Velocità media (m/s)	Sezione idraulica(m ²)	Larghezza massima(m)	Numero di Froude
200	4.84	86.43	91.27	91.34	0.043%	1.17	149.9	54.6	0.20
190	4.33	86.82	91.15	91.23	0.146%	1.44	158.3	128.1	0.25
180	4.10	86.97	91.08	91.09	0.028%	0.53	377.6	243.6	0.11
170	4.11	86.86	90.97	91.01	0.064%	0.96	206.1	92.3	0.17
160	4.45	86.36	90.80	90.87	0.091%	1.20	164.9	79.0	0.20
150	4.43	86.36	90.78	90.85	0.096%	1.16	159.9	84.4	0.21
140	5.00	85.72	90.72	90.76	0.049%	0.82	195.1	77.4	0.16
130	4.14	86.48	90.63	90.67	0.090%	0.94	172.9	102.1	0.22
120	4.01	86.54	90.55	90.61	0.070%	1.04	153.5	78.9	0.24
110	4.28	86.25	90.53	90.59	0.012%	1.12	142.6	40.4	0.18
105 PONTE CANALE									
100	4.67	85.85	90.52	90.58	0.011%	1.10	145.8	49.8	0.18
90	3.88	86.58	90.46	90.56	0.049%	1.40	114.8	65.3	0.33
80	4.39	86.06	90.45	90.53	0.023%	1.29	136.4	57.1	0.24
70	4.62	85.83	90.46	90.52	0.017%	1.16	161.6	62.8	0.21
60	4.23	86.01	90.24	90.48	0.038%	2.14	74.7	24.4	0.34
55 PONTE FERROVIARIO ESISTENTE									
50	4.51	85.72	90.23	90.46	0.047%	2.15	74.4	19.9	0.34
47	5.36	85.00	90.36	90.41	0.012%	1.02	187.9	80.1	0.17
43	5.37	84.99	90.36	90.40	0.012%	1.02	188.3	79.9	0.17
40	5.08	85.25	90.33	90.40	0.017%	1.22	149.2	61.9	0.20
30	4.65	85.66	90.31	90.37	0.055%	1.02	163.3	66.0	0.19
20	4.58	85.67	90.26	90.30	0.051%	0.96	167.3	59.6	0.18
10	4.54	85.66	90.20	90.24	0.032%	0.92	208.7	84.0	0.15

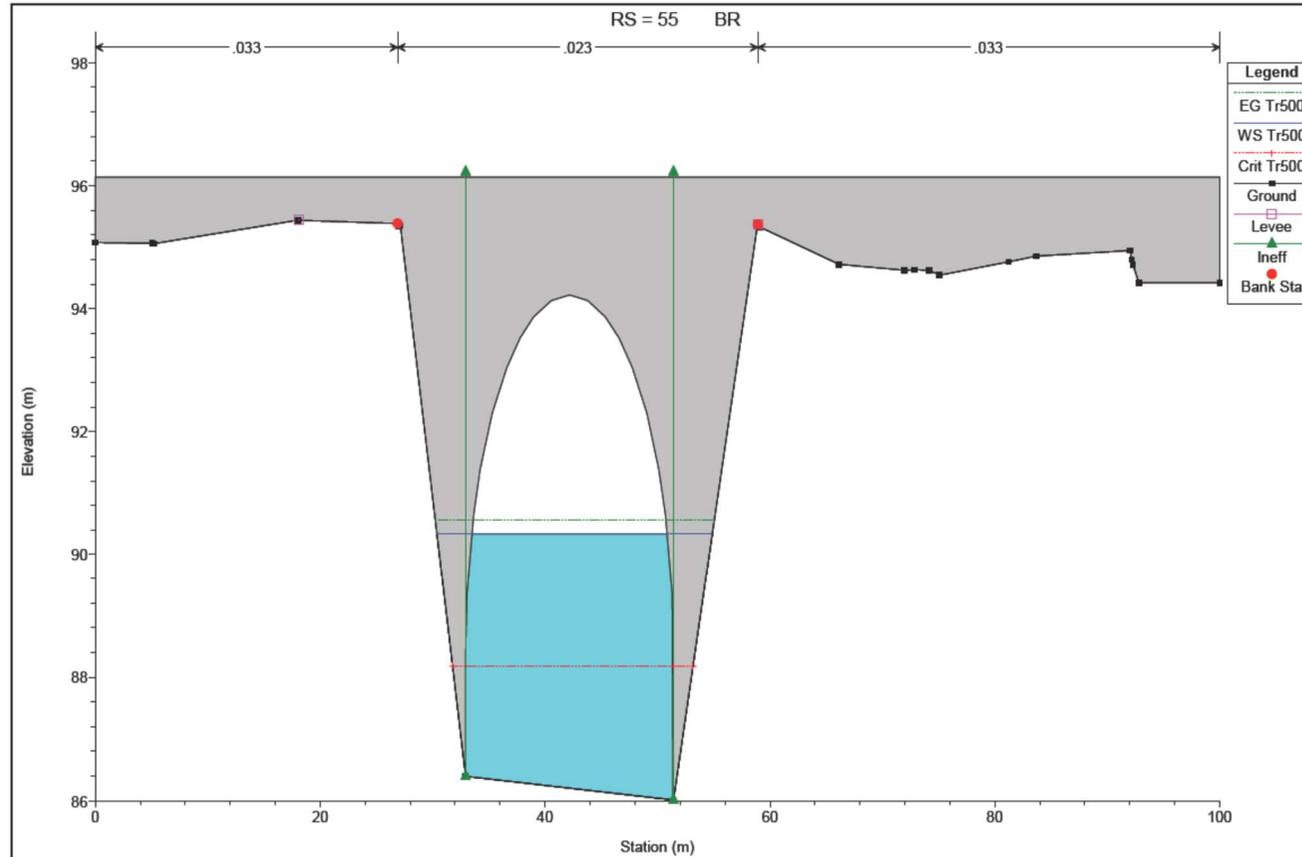
PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA
FASE 1 – QUADRUPLCAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

**RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI
COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO
MERIDIONALE**

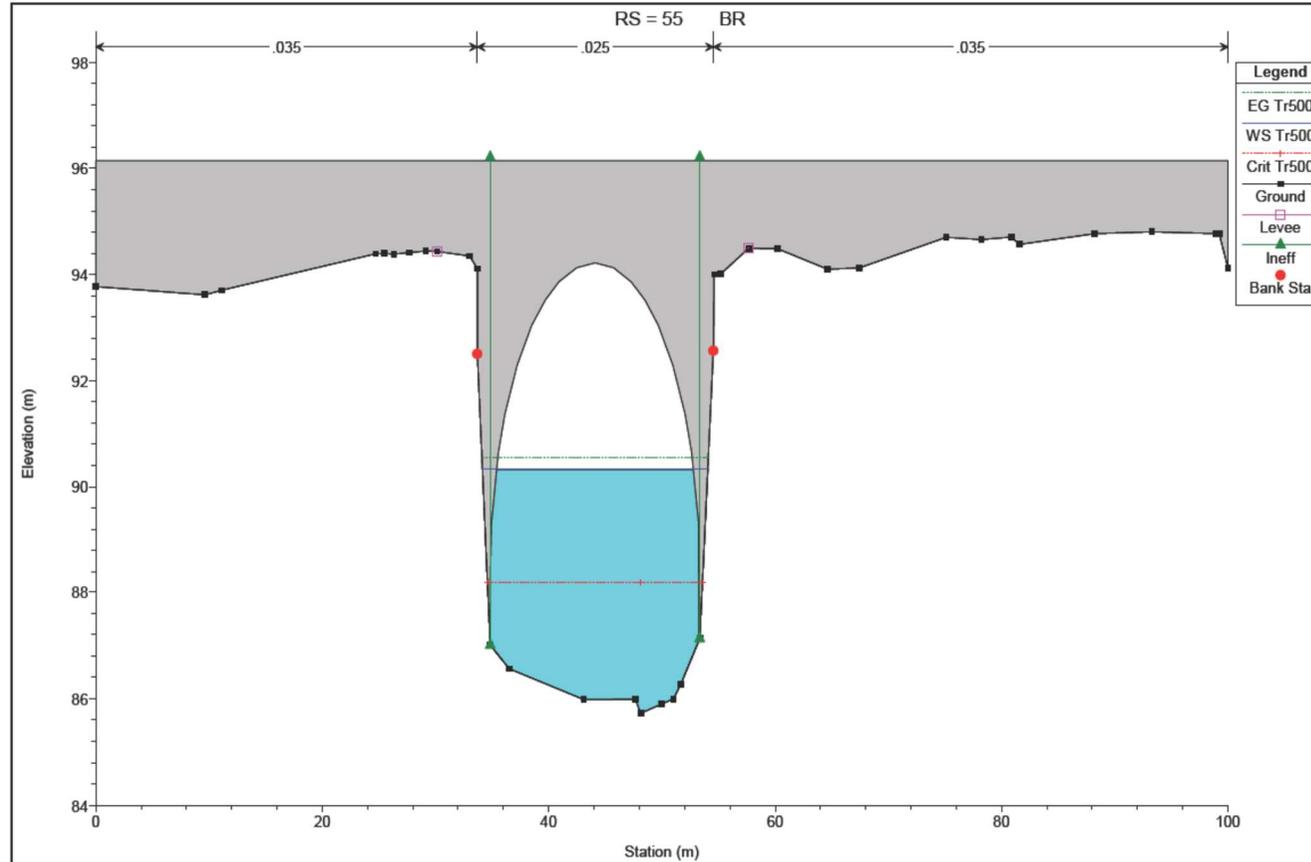
COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	LAMBRO MERIDIONALE
NM0Z	10	D26	RIID0002001	A	23 di 39



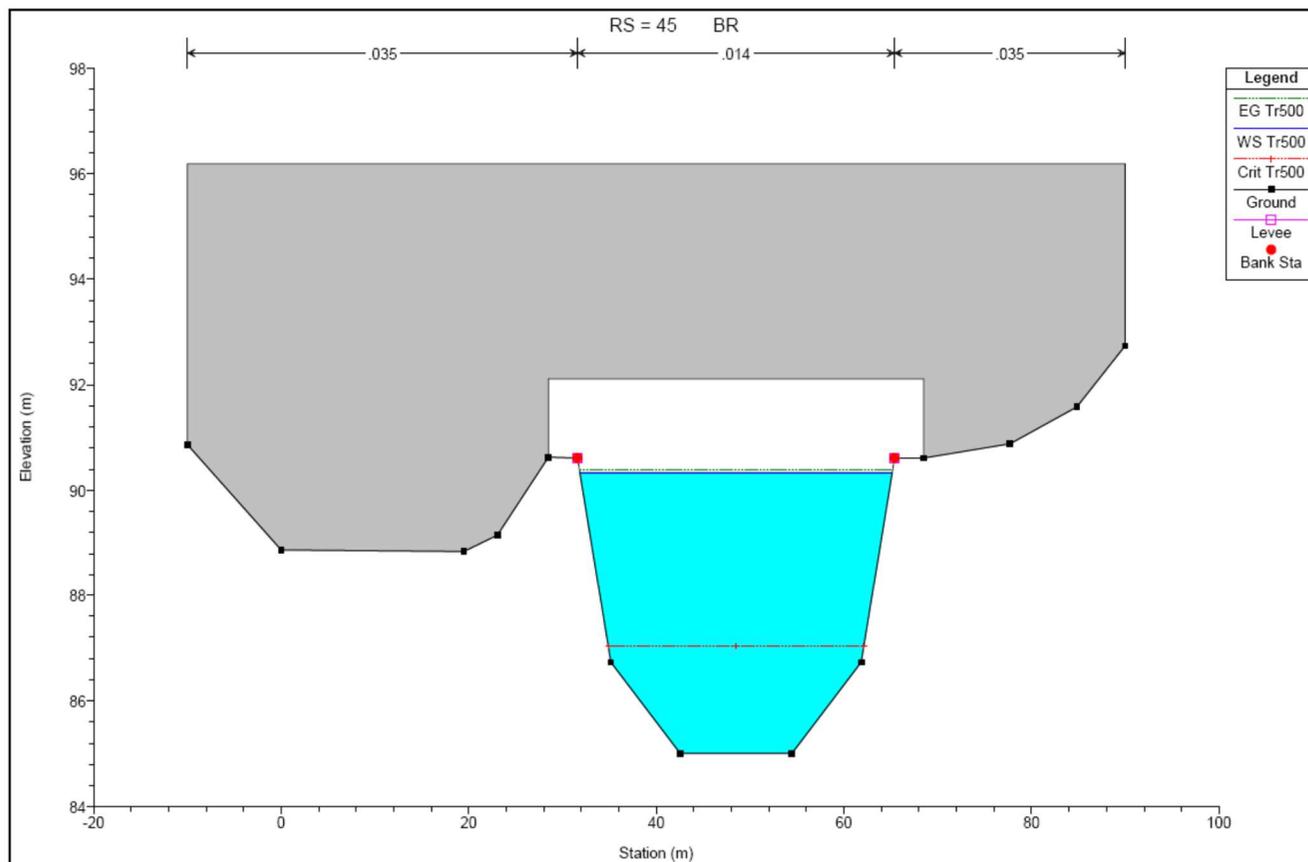
Profilo simulazione Q_{500} post operam



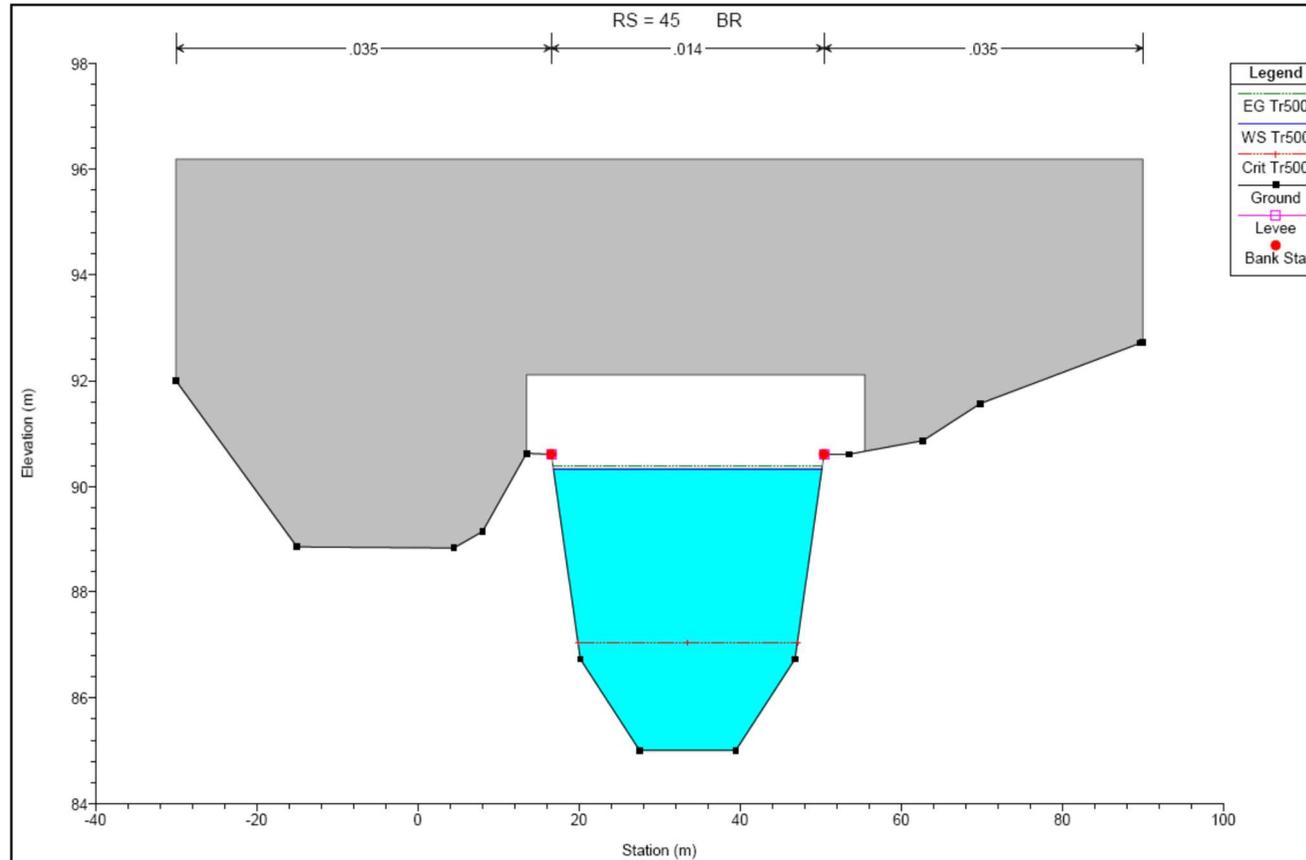
Sezione di monte attraversamento ferroviario esistente - Q_{500} post operam



Sezione di monte attraversamento ferroviario esistente - Q_{500} post operam



Sezione di monte attraversamento ferroviario di progetto - Q_{500} post operam



Sezione di valle attraversamento ferroviario di progetto - Q_{500} post operam

PROGETTO DEFINITIVO
POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA
QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA
FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE

**RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI
COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO
MERIDIONALE**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	LAMBRO MERIDIONALE
NM0Z	10	D26	RIID0002001	A	28 di 39

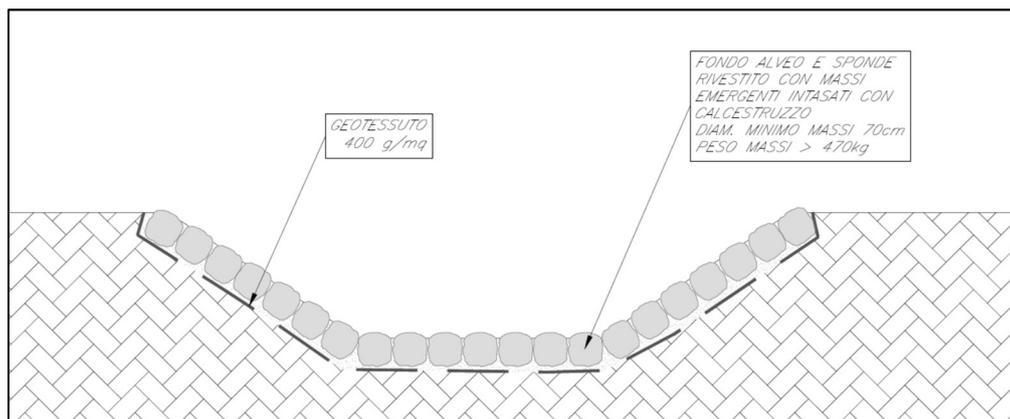
Tabulato variabili idrauliche Q₅₀₀ post operam

Sezione	Tirante idraulico(m)	Quota minima(m)	Quota livello idrico(m)	Carico totale(m)	Pendenza motrice	Velocità media (m/s)	Sezione idraulica(m ²)	Larghezza massima(m)	Numero di Froude
200	4.84	86.43	91.27	91.34	0.043%	1.17	149.7	54.6	0.20
190	4.33	86.82	91.14	91.23	0.147%	1.44	157.8	127.3	0.25
180	4.10	86.97	91.07	91.08	0.028%	0.53	376.4	243.2	0.11
170	4.11	86.86	90.97	91.00	0.064%	0.96	205.6	92.2	0.17
160	4.44	86.36	90.80	90.86	0.092%	1.20	164.4	78.9	0.20
150	4.42	86.36	90.78	90.84	0.097%	1.16	159.3	84.1	0.21
140	4.99	85.72	90.72	90.75	0.049%	0.82	194.5	77.3	0.16
130	4.13	86.48	90.62	90.66	0.091%	0.95	172.1	101.9	0.22
120	4.00	86.54	90.54	90.60	0.071%	1.05	152.7	78.9	0.24
110	4.27	86.25	90.52	90.58	0.012%	1.12	142.2	40.4	0.18
105 PONTE CANALE									
100	4.66	85.85	90.51	90.57	0.011%	1.10	145.4	49.7	0.18
90	3.87	86.58	90.45	90.55	0.050%	1.40	114.1	65.2	0.34
80	4.38	86.06	90.44	90.52	0.023%	1.29	135.8	56.9	0.24
70	4.61	85.83	90.45	90.51	0.018%	1.16	160.9	62.6	0.21
60	4.22	86.01	90.23	90.47	0.038%	2.15	74.5	24.4	0.34
55 PONTE FERROVIARIO ESISTENTE									
50	4.49	85.72	90.22	90.45	0.047%	2.16	74.2	19.9	0.34
47	5.33	85.01	90.34	90.40	0.004%	1.13	141.4	33.3	0.18
45 PONTE FERROVIARIO DI PROGETTO									
43	5.33	85.01	90.34	90.40	0.004%	1.13	141.4	33.3	0.18
40	5.08	85.25	90.33	90.40	0.017%	1.22	149.2	61.9	0.20
30	4.65	85.66	90.31	90.37	0.055%	1.02	163.3	66.0	0.19
20	4.58	85.67	90.26	90.30	0.051%	0.96	167.3	59.6	0.18
10	4.54	85.66	90.20	90.24	0.032%	0.92	208.7	84.0	0.15

6. RIPROFILATURA SEZIONE ALVEO

In corrispondenza della sezione 47 e 43 la sezione attuale viene riprofilata e rivestita in massi cementati affinché la portata con cinquecentennale di progetto possa defluire senza lambire le spalle del nuovo attraversamento.

Tale accorgimento definisce non solo il fondo alveo in corrispondenza dell'attraversamento ma scongiura anche il fenomeno di erosione al piede delle spalle con conseguente possibile scalzamento dell'opera.



Protezione tipo con massi da cementati

Per il dimensionamento della sistemazione idraulica pocanzi descritta si fa riferimento a più di una formulazione.

- Federal Highway Administration (FHWA) per il dimensionamento delle scogliere di protezione (Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance-Third Edition - Volume 2", *Publication No. FHWA-NHI-09-112, Hydraulic Engineering Circular No. 23, September 2009.*).

Si stima il diametro medio dei massi d_{50} attraverso la seguente equazione:

$$d_{50} = \frac{0,692 \cdot (V_{des})^2}{(S_g - 1) \cdot 2g}$$

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

nella quale:

- d_{50} = diametro medio dei massi (m);
- V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);
- S_g = peso specifico dei massi (t/m^3);

La velocità di progetto deve rappresentare le condizioni nelle immediate vicinanze delle pile. Qualora si dovesse adottare un valore medio di velocità, questo deve essere opportunamente moltiplicato per i fattori che sono funzione della forma della pila e della sua posizione rispetto all'alveo:

$$V_{des} = K_1 K_2 V_{avg}$$

Se si dispone di una distribuzione di velocità risultante da modello fisico o da calcolo idraulico 1D o 2D, allora si può utilizzare solamente il coefficiente della forma della pila. Sarebbe opportuno considerare il valore massimo della velocità nell'alveo attivo V_{max} , dal momento che l'alveo stesso può spostarsi nel tempo e la massima velocità impatterebbe le pile.

$$V_{des} = K_1 V_{max}$$

in cui:

- V_{des} = velocità di progetto locale intorno alla pila (m/s);
- K_1 = fattore di forma pari a 1,5 per pile circolari “round-nose” o 1,7 per pile a spigoli vivi;
- K_2 = fattore di correzione della velocità per l'ubicazione nell'alveo (varia da 0,9 per pile vicino le sponde in alveo rettilineo, fino a 1,7 per pile immerse nel filone principale della corrente);
- V_{avg} = velocità media nell'alveo in corrispondenza del ponte (m/s);
- V_{max} = velocità massima nell'alveo attivo (m/s).

Applicando le grandezze idrauliche della sezione più sollecitata, la sez. 50 in corrispondenza del ponte esistente, ponendo $S_g=2.65 t/m^3$, $K_1=1,5$ e $K_2=1,7$ con un velocità media in alveo $v=2.16m/s$ si ricava un $d_{50}=0.65m$

- Brown, S.A. and Clyde, E.S. 1989. “*Design of riprap revetment*”. Report FHWA-IP-89-016, prepared by Sutron Corporation for U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC.

In questo caso la stima del diametro medio d_{50} avviene secondo quanto di seguito illustrato

$$d_{50} = 0.001 C_{sg} C_{sf} \frac{V_a^3}{d_{avg}^{0.5} K_1^{1.5}}$$

in cui:

- d_{50} = diametro medio dei massi (ft)
- V_a = velocità media (ft/s)
- d_{avg} = tirante medio (ft)
- $C_{sg} = 2.12/(S_g-1)^{1.5}$
- S_g = peso specifico dei massi (t/m^3)
- $C_{sf} = (SF/1.2)^{1.5}$
- SF = fattore di stabilità
- $K_1 = [1 - \sin^2(\theta)/\sin^2(\phi)]^{0.5}$
- θ = inclinazione delle sponde
- ϕ = angolo di attrito interno del materiale

Applicando le grandezze idrauliche della sez. 50 in corrispondenza del ponte esistente, ponendo $S_g=2.65 t/m^3$ e cautelativamente $SF=2$, con una velocità media in alveo $v=2.16m/s$ e un'inclinazione delle sponde $\theta= 35^\circ$ e un angolo di attrito interno del materiale $\phi=38^\circ$ si ricava un $d_{50}=0.30m$.

Alla luce di quanto sopra riportato si sceglie di utilizzare dei massi con $d_{50}=0.70m$ a vantaggio di sicurezza e anziché utilizzare massi sciolti si provvederà a cementarli tra loro.

Si prevede la protezione in massi cementati sotto l'opera esistente 5m oltre l'opera di progetto.

Sulle sponde si inseriscono inoltre materassi tipo Reno fino a un metro di franco sul livello idrico.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

7. STIMA LIVELLO IDRICO OPERE PROVVISORIALI

Sulla base di quanto esposto sopra, al fine di rispettare sia le prescrizioni emanate dall’Autorità di bacino del Fiume Po, le prescrizioni ferroviarie e delle NTC 2018, le verifiche idrauliche sono state condotte con riferimento ad un evento di piena con tempo di ritorno pari a 500 anni.

Di seguito è stata quindi condotta una verifica idraulica con riferimento alle fasi più significative di costruzione dell’opera, tenendo conto delle opere provvisionali. Il tempo di ritorno della piena da assumere per tali valutazioni è quello la cui probabilità di essere raggiunta o superata una volta nel periodo temporale corrispondente alle fasi costruzione non è superiore alla probabilità che ha la portata di progetto di essere raggiunta o superata una volta nel periodo di vita dell’opera.

Tale definizione richiama il concetto di “rischio idraulico”, cioè la probabilità composta di non superamento che un determinato evento caratterizzato da tempo di ritorno assegnato T_R si manifesti nel corso di un periodo temporale prefissato N .

Lo sviluppo della formulazione di tempo di ritorno, associato alla probabilità composta per la quale l’evento si manifesti all’interno dell’orizzonte temporale stabilito, porta alla seguente formulazione del rischio idraulico:

$$R_i = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R}\right)^N$$

nella quale

- R_i rischio idraulico inteso come probabilità di non superamento
- T_R tempo di ritorno dell’evento di riferimento (anni)
- N orizzonte temporale di riferimento (anni)

Poiché nel caso in esame la vita utile dell’opera è pari a 100 anni ed il tempo di ritorno dell’evento di progetto è fissato a 500 anni, il rischio idraulico sopra definito risulta essere pari a $R_i=0.1814$.

Imponendo per le opere provvisionali lo stesso rischio idraulico definito per l’opera finita, è possibile determinare il tempo di ritorno dell’evento di piena di riferimento per la fase transitoria di cantiere tramite la seguente formula:

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

8. ANALISI DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA

Di seguito viene analizzata sia la compatibilità idraulica dell'opera di attraversamento in progetto con il territorio che la sicurezza del corpo ferroviario identificando in termini di funzionalità e sicurezza.

8.1. Strumenti normativi

La nuova infrastruttura che interferisce con il Fiume Lambro deve soddisfare le prescrizioni previste dalle diverse normative vigenti; in particolare gli strumenti normativi a cui si fa riferimento sono:

- *Norme di Attuazione – Direttive di Piano PAI Fiume Po (NTA)*
- *Manuale di Progettazione Ferroviaria 2018 (MdP)*
- *Norme Tecniche Costruttive 2008 (NTC)*

Norme di Attuazione – PAI Fiume PO

La normativa fluviale che va adottata per la verifica del Fiume Lambro Meridionale è contenuta nelle Norme di Attuazione del Piano Stralcio di Bacino del Fiume Po ed in particolare nella direttiva n°4, *'Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B'* (approvata deliberazione del Comitato Istituzionale n. 2 dell'11 maggio 1999 - aggiornata con deliberazione con delibera dell'Autorità di Bacino n.10 del 5 aprile 2006 già n.2/99).

La Direttiva n°4 allegata alle Norme di Attuazione del PAI, in merito al tempo di ritorno della piena di progetto per le verifiche idrauliche del viadotto impone una portata corrispondente ad un $Tr=200$ anni (corrispondente con quello assunto per la delimitazione della fascia B).

Si fa riferimento in particolare al paragrafo 3.2. *"Criteri di compatibilità idraulica per i ponti e i rilevati di accesso in progetto"* prevedono in particolare per il franco idraulico al punto 3.2.2 che *"...Il minimo franco tra la quota idrometrica relativa alla piena di progetto e la quota di intradosso del ponte deve essere non inferiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore a 1.00 m. Il valore del franco deve essere assicurato per almeno i 2/3 della luce quando l'intradosso del ponte non sia rettilineo e comunque per almeno 40m, nel caso di luci superiori a tale valore. Nel caso di corsi d'acqua arginati, la quota del ponte deve essere superiore a quella della sommità arginale..."*.

Al punto 3.2.3 *Posizionamento del ponte rispetto all'alveo* si precisa che:

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

“L’insieme delle opere costituenti l’attraversamento non deve comportare condizionamenti al deflusso della piena e indurre modificazioni all’assetto morfologico dell’alveo. L’orientamento delle pile (ed eventualmente delle spalle) deve essere parallelo al filone principale della corrente.

In particolare devono essere rispettate le seguenti condizioni:

- *per i corsi d’acqua arginati la spalla del ponte deve essere sul lato campagna, a una distanza minima di 10 m dal piede dell’argine maestro; lo stesso limite vale per il caso siano presenti pile sul lato campagna; sul lato fiume la posizione delle pile deve essere al di fuori del petto dell’argine; in via eccezionale la pila può interessare il corpo arginale, purché non intacchi il nucleo centrale dell’argine stesso e sia integrata con opportuni accorgimenti di difesa e di rivestimento;*
- *per i corsi d’acqua non arginati le pile e le spalle devono essere poste al di fuori delle sponde incise dell’alveo; in via eccezionale la pila può interessare la sponda, purché sia integrata con opportuni accorgimenti di difesa e di rivestimento;*
- *nei casi in cui il ponte sia inserito in un tratto di corso d’acqua interessato da altre opere di attraversamento poste in adiacenza, a monte o a valle, è necessario che le pile in alveo (ed eventualmente le spalle) siano allineate con quelle esistenti in modo che le pile presenti, considerate congiuntamente, non riducano la luce effettiva disponibile, anche ai fini del rischio di ostruzione da parte del materiale trasportato in piena;*
- *la struttura deve consentire il mantenimento della continuità della pista di servizio in fregio al corso d’acqua ovvero sul rilevato arginale.”*

Manuale di Progettazione Ferroviaria

Il Manuale di Progettazione Ferroviaria distingue tra attraversamenti di corsi d’acqua principali e secondari a seconda che il bacino afferente agli attraversamenti sia superiore o inferiore ai 10 km².

Per i suddetti attraversamenti nella *Parte II – Sezione 3* al punto 3.7.2.1.4 a) si prevede che:

“Sulla base dei dati idrometrici ovvero dello studio idrologico, ad ogni tipo di manufatto idraulico verranno associati i seguenti tempi di ritorno Tr :

[...]

Manufatti di attraversamento (ponti e tombini):

– linea ferroviaria $Tr = 300$ anni per $S \geq 10$ km².

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NM0Z	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

– linea ferroviaria $Tr = 200$ anni per $S < 10 \text{ km}^2$.
 (essendo S la superficie del bacino)”

Per gli attraversamenti principali, come il Fiume Lambro Meridionale, il MdP al punto 3.7.2.2.1 prevede che:

“Relativamente ai requisiti idraulici nei confronti dei livelli di massima piena si specifica quanto segue:

- franco minimo tra l'intradosso dell'opera e la quota del carico idraulico totale corrispondente al livello idrico di massima piena, calcolato come precedentemente descritto, pari a 0.50 m e comunque non inferiore ad 1.50 m sul livello idrico nella sezione immediatamente a monte dell'attraversamento
- posizionamento delle spalle del viadotto in modo tale da non ridurre significativamente la sezione di deflusso in alveo ed in golena;
- posizionamento e geometria delle pile in alveo ed in golena in modo da non provocare significativi fenomeni di rigurgito ovvero fenomeni di erosione localizzati sulle sponde ed in alveo.
- Il calcolo dello scalzamento localizzato indotto dalle opere di sostegno deve essere valutato considerando le dimensioni delle pile; nel caso in cui il plinto di fondazione venga messo allo scoperto dall'erosione, le dimensioni maggiori e le forme più tozze dello stesso provocano un ulteriore scalzamento e pertanto, in tale condizione, il calcolo dell'erosione localizzata va ripetuto portando in conto la diversa geometria.

Il MdP in materia di attraversamenti dei corsi d'acqua prescrive che per il Fiume Lambro Meridionale sia eseguito il calcolo del profilo idraulico per una portata corrispondente ad un tempo di ritorno pari a 300 anni.

Le Norme Tecniche Costruttive 2008 (NTC)

Le norme Tecniche Costruttive 2008 al punto 5.1.2.4 prescrivono che la nuova struttura di attraversamento deve essere rapportata ad un evento di progetto con $Tr=200$ anni.

“...La quota idrometrica ed il franco dovranno essere posti in correlazione con la piena di progetto

	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE					
	RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE	COMMESSA NMOZ	LOTTO 10	CODIFICA D26	DOCUMENTO RIID0002001	REV. A

riferita ad un periodo di ritorno non inferiore a 200 anni...”

L'analisi idraulica svolta ha permesso di individuare le condizioni di deflusso ed i livelli idrici in corrispondenza delle opere di attraversamento ferroviario, esistenti ed in progetto, nell'ambito della progettazione del quadruplicamento della linea MI-GE tratta Milano Rogoredo – Pieve Emanuele.

In particolare è stato verificato che i deflussi di progetto verifichino rispettivamente le norme del PAI, le prescrizioni ferroviarie del MdP e le NTC.

- **PAI - portata di piena con 200 anni di tempo di ritorno:** si verifica che la distanza tra la quota idrometrica relativa alla piena in esame e la quota di intradosso del ponte in progetto sia superiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore ad 1.00 m.

La tabella mostra il livello idrico in corrispondenza del ponte del ponte di progetto considerando la simulazione generata dal profilo idraulico della piena cinquecentennale nella configurazione ante operam e post operam:

Configurazione	Opera	Tr	Quota livello idrico	Quota carico totale	Quota intradosso impalcato	Franco rispetto al pelo libero	Franco rispetto al carico totale
		(anni)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)
Ante Operam	Ponte esistente	500	90.24	90.48	94.22	2.70	2.64
Post Operam	Ponte esistente	500	90.23	90.47	94.22	2.71	2.65
Post Operam	Ponte di progetto	500	90.34	90.40	92.10	1.76	1.70

La collocazione del nuovo ponte ferroviario rispetta le prescrizioni indicata dalle norme di attuazione previste dalla ADBPO in merito al franco idraulico.

- **Manuale di Progettazione Ferroviaria - portata di piena con 300 anni di tempo di ritorno:** si verifica che la distanza tra la quota del carico idraulico totale e l'intradosso dell'impalcato del nuovo ponte sia superiore a 0.50 m. e non inferiore a 1.00m dal livello idrico per l'evento di piena con Tr=300 anni.

Configurazione	Opera	Tr	Quota livello idrico	Quota carico totale	Quota intradosso impalcato	Franco rispetto al pelo libero	Franco rispetto al carico totale
----------------	-------	----	----------------------	---------------------	----------------------------	--------------------------------	----------------------------------

		(anni)	(m s.l.m.)				
Ante Operam	Ponte esistente	500	90.24	90.48	94.22	2.70	2.64
Post Operam	Ponte esistente	500	90.23	90.47	94.22	2.71	2.65
Post Operam	Ponte di progetto	500	90.34	90.40	92.10	1.76	1.70

Anche le prescrizioni ferroviarie sono soddisfatte dal nuovo.

- **NTC 2008 - portata di piena con 200 anni di tempo di ritorno:** si verifica che la distanza tra la quota idrometrica relativa alla piena in esame e la quota di intradosso del ponte in progetto sia superiore a 0.5 volte l'altezza cinetica della corrente e comunque non inferiore ad 1.50 m.

Configurazione	Opera	Tr	Quota livello idrico	Quota carico totale	Quota intradosso impalcato	Franco rispetto al pelo libero	Franco rispetto al carico totale
		(anni)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)	(m s.l.m.)
Ante Operam	Ponte esistente	500	90.24	90.48	94.22	2.70	2.64
Post Operam	Ponte esistente	500	90.23	90.47	94.22	2.71	2.65
Post Operam	Ponte di progetto	500	90.34	90.40	92.10	1.76	1.70

Anche le norme progettuali indicate nelle NTC sono verificate in ogni situazione attesa.

Le analisi svolte, pur con le cautele legate alle approssimazioni che è stato necessario introdurre nei calcoli, evidenziano le seguenti indicazioni per quanto riguarda il tratto indagato:

- la simulazione effettuate mostrano che l'attuale sezione d'alveo in corrispondenza del ponte è adeguata a contenere il deflusso della portata cinquecentennale, di conseguenza anche la duecentennale e trecentennale, sia nella configurazione ante operam che post operam. In ogni caso non si inseriscono elementi di disturbo in alveo rispetto alla situazione attuale.
- l'inserimento del previsto ponte ferroviario non determina a monte della struttura alcun mutamento dei livelli idrometrici a monte e a valle dell'attraversamento; le spalle della nuova

 <p>ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE</p>	<p>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO DELLA LINEA MILANO – GENOVA QUADRUPPLICAMENTO TRATTA MILANO ROGOREDO – PAVIA FASE 1 – QUADRUPPLICAMENTO MI ROGOREDO – PIEVE EMANUELE</p>					
<p>RELAZIONE IDROLOGICA, IDRAULICA E DI COMPATIBILITA' IDRAULICA FIUME LAMBRO MERIDIONALE</p>	<p>COMMESSA NM0Z</p>	<p>LOTTO 10</p>	<p>CODIFICA D26</p>	<p>DOCUMENTO RIID0002001</p>	<p>REV. A</p>	<p>LAMBRO MERIDIONALE 39 di 39</p>

opera, a seguito della sistemazione idraulica locale, non sono interessate dal deflusso che avviene indisturbato ricalcando perfettamente la situazione ante operam.

I risultati delle verifiche idrauliche sono riportati, in forma grafica e tabellare nel presente documento e negli elaborati di riferimento: NM0Z10D26P6ID0002001, NM0Z10D26W7ID0002001, NM0Z10D26W7ID0002002, NM0Z10D26F7ID0002001, NM0Z10D26F7ID0002002, NM0Z10D26P7ID0002001A e NM0Z10D26P7ID0002002.

8.2.La compatibilità idraulica dell'infrastruttura

Il corso d'acqua nel tratto in esame attraversa un'area localmente poco urbanizzata con edifici e fabbricati non a ridosso all'alveo di piena.

Tra le infrastrutture di trasporto esistenti si annoverano il ponte ferroviario della linea storica Milano-Genova e il ponte canale tra le sezioni 110 e 100; il deflusso in corrispondenza degli attraversamenti avviene sempre a pelo libero

L'opera di progetto non crea innalzamenti e non produce scostamenti tra i livelli relativi monte/valle degli attraversamenti esistenti; in pratica non si va ad incrementare l'attuale rischio idraulico in quanto non si rilevano cambiamenti alcuni negli scenari di piena ante operam e post opera.

Alla luce di quanto sopra esposto, le condizioni di rischio idraulico relative sia alla configurazione finale di progetto, sia in relazione all'attuale assetto idraulico del corso d'acqua risultano ammissibili.

Il progetto in esame si ritiene dunque compatibile con le norme della legislazione vigente di protezione dai rischi idraulici e con la configurazione attuale dei luoghi.

Coerentemente a quanto espresso in merito di compatibilità idraulica dell'opera, l'inserimento della nuova infrastruttura non genera variazioni di rischio idraulico in quanto i due scenari ante e post operam sono essenzialmente sovrapponibili.