



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO



**MANUTENZIONE STRAORDINARIA DEL FIUME LAMBRO E
AFFLUENTI NEL TRATTO TRA I COMUNI DI NIBIONNO E
VILLASANTA**

COMUNI DI INVERIGO, VERANO BRIANZA, CARATE BRIANZA

SOVICO E VILLASANTA

**PROGETTO DEFINITIVO-ESECUTIVO
RELAZIONE TECNICA**

Il progettista

Ing. Stefano Minà

Ing. Maria Teresa Olmeo

Triuggio, Settembre 2014



INDICE

1. PREMESSA.....	4
2. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO	5
2.1. INTERVENTI PREVISTI.....	5
2.1.1. Comune di Inverigo: intervento 1.....	5
2.1.2. Comune di Verano Brianza: intervento 2.....	6
2.1.3. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Agliate: intervento 3	7
2.1.4. Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4	7
2.1.5. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Realdino: intervento 5	11
2.1.6. Comune di Sovico: intervento 6	13
2.1.7. Comune di Villasanta: intervento 7	14
3. RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA	15
3.1. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI	15
3.2. “PROGETTO DI PIANO STRALCIO PER L’ASSETTO IDROGEOLOGICO”	16
3.2.1. Stato di fatto.....	17
3.2.2. Assetto di progetto	19
3.3. IDROLOGIA	20
3.3.1. Portate di piena del PAI.....	20
3.3.2. Definizione delle portate di piena di riferimento	21
3.3.3. Definizione della portata di progetto.....	22
3.4. IDRAULICA.....	26
3.4.1. Modellazione numerica idraulica: descrizione del codice di calcolo	26
3.4.2. Costruzione della geometria del modello di stato di fatto	27
3.4.2.1. Verifica di congruenza con il modello dell’Autorità di Bacino	29
3.5. Simulazioni effettuate.....	30
3.5.1. Comune di Verano Brianza: intervento 2.....	30
3.5.2. Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4	31
3.5.2.1. Stato di fatto.....	31
3.5.2.2. Progetto	32
3.5.3. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Realdino: intervento 5	33
4. RELAZIONE STRUTTURALE	35
4.1. DIMENSIONAMENTO DEI MURI DI SPONDA.....	35



4.1.1.	Comune di Verano Brianza: intervento 2	37
4.1.2.	Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4	38
4.2.	DIMENSIONAMENTO DELLO SCATOLARE DI ATTRAVERSAMENTO	39
4.2.1.	Normativa di riferimento	39
4.2.2.	Descrizione dell'opera.....	40
4.2.3.	Verifica dell'opera.....	40

ALLEGATI

- ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo HEC-RAS



1. PREMESSA

La presente relazione tecnica è relativa alla progettazione definitiva esecutiva di una serie di interventi di manutenzione straordinaria previsti lungo l'asta del fiume Lambro nel tratto compreso tra i Comuni di Inverigo e quello di Villasanta, finalizzati prevalentemente alla stabilizzazione delle sponde ed all'ottimizzazione della sicurezza idraulica.

Nelle pagine che seguono sono descritte nel dettaglio le lavorazioni previste per le opere in progetto, ne sono riportate le verifiche idrauliche sviluppate all'interno dello Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali nell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona (2004, AdbPo), cui si è fatto riferimento per l'individuazione dei tiranti idrici e quindi del ciglio di progetto delle difese di sponda; infine sono state condotte le verifiche di stabilità necessarie per il dimensionamento delle stesse difese di sponda e il dimensionamento strutturale dello scatolare adottato per l'attraversamento della roggia esistente in zona Porenzella nel Comune di Carate Brianza.



2. DESCRIZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

Di seguito è riportata la descrizione degli interventi previsti dal progetto.

2.1. INTERVENTI PREVISTI

2.1.1. Comune di Inverigo: intervento 1

L'intervento consiste nella stabilizzazione del terreno retrostante del tratto di palificata in destra idrografica per un'estensione di circa 35 metri, al fine di evitare che il fiume possa continuare il suo processo di erosione-allontanamento della parte fine del terreno.

Per tale motivo occorre contenere il terreno adiacente ai pali in una sacca di geotessuto per una profondità di circa 40-50 cm, maggiore all'altezza dell'acqua presente in alveo riuscendo così a trattenere la parte fine del terreno.

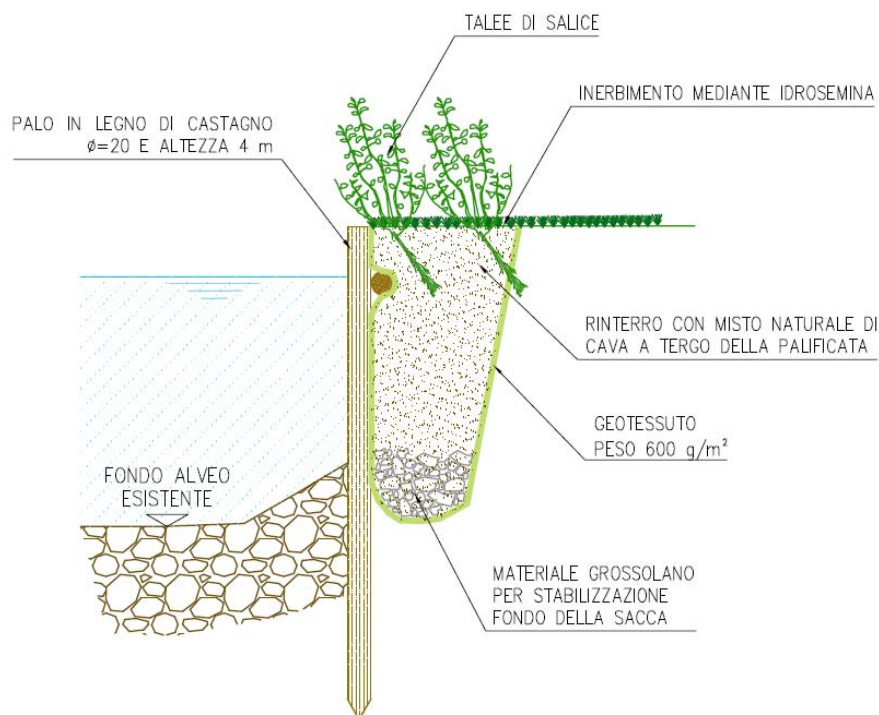


Figura 1 – Particolare costruttivo dell'intervento di stabilizzazione di sponda



Osservando la sezione dell'intervento si avrà: da un lato il geotessuto che segue la palificata e dall'altro risale formando una specie di sacca a "v". Il riempimento prevede da una parte il posizionamento sul fondo del materiale più grossolano con funzione stabilizzante del geotessuto, e nella zona più superficiale il ripristino degli strati di terreno e del manto erboso. Per garantire un'ulteriore stabilità alla sponda la palificata verrà ultimata con messa a dimora di talee di salice e/o piantine radicate di specie arboree e arbustive idonee. Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alla *Tav.2 Comune di Inverigo - intervento 1: planimetria di progetto e particolare costruttivo*.

2.1.2. Comune di Verano Brianza: intervento 2

L'intervento 2 si divide nei seguenti sotto-interventi:

- **Intervento 2.1:** Sistemazione della difesa di sponda in destra idraulica con formazione argine in terre armate;
- **Intervento 2.2:** Formazione di un pennello in massi ciclopici per deviazione materiale flottante.

L'intervento 2.1 consiste nella sistemazione del tratto di sponda ammalorato mediante la riprofilatura della sponda in destra idraulica per un tratto complessivo di circa 70 metri, con tecniche di ingegneria naturalistica. In realtà la sponda non verrà semplicemente riprofilata ma in alcuni tratti, laddove è possibile, verrà anche leggermente arretrata.

La riprofilatura verrà realizzata mediante una berma di fondazione, ad oggi del tutto assente, realizzata in parte con i massi esistenti e in parte con massi di cava, di volume non inferiore a 0,80 m³; il ciglio superiore della berma sarà posizionato alla quota del fondo alveo e si approfondirà di circa 1,5 m. La mantellata, intestata sulla berma di fondazione, avrà uno spessore minimo di 1 m e una pendenza del paramento di sponda 2 su 3. Per un migliore inserimento ambientale e per garantire un adeguato mascheramento dell'opera, la mantellata sarà intasata con terreno vegetale e successivamente inerbita con la tecnica dell'idrosemia.

Per garantire ulteriore stabilità alla sponda e una maggiore resistenza all'azione erosiva del fiume la testa della sponda verrà rinforzata con uno strato di terre armate dello spessore di circa 0,20 m e comunque sufficiente per garantire il raggiungimento del livello idrico corrispondente alla piena di riferimento storica che in questo caso è data dalla quota dedotta dallo studio di fattibilità



dell'AdB nelle condizioni di progetto e che varia tra 216,12 m s.l.m. e 215,90 m s.l.m. Per maggiori dettagli si rimanda alla relazione tecnica allegata al presente progetto.

L'intervento 2.2 consiste nella formazione di un pennello in massi ciclopici della lunghezza di circa 5 m con lo scopo di deviare il materiale flottante trasportato dalla corrente salvaguardando da possibili intasamenti l'opera di presa della roggia di derivazione dei vecchi mulini. In questo caso i massi avranno un volume non inferiore ad 1 m³.

Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alle tavole *Tav. 3.1, Tav. 3.2 e Tav. 3.3 Comune di Verano e Carate Brianza - intervento 2 e 3.*

2.1.3. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Agliate: intervento 3

L'intervento consiste nella creazione di una trappola per sedimenti nel tratto subito a valle del ponte di Agliate ed in particolare tra il ponte e la soglia subito a valle, in una zona oggi soggetta ad accumuli di cospicue quantità di sedimento. La trappola progettata sarà collocata circa 20 m a valle del ponte ed avrà una larghezza trasversale di circa 6 m ed una longitudinale di circa 20 m, con una profondità di circa 1 m rispetto al fondo dell'alveo. La trappola consentirà ad ARPA di condurre delle indagini sulla quantità e la qualità del materiale trasportato dal fiume per predisporre un piano di monitoraggio dei sedimenti. La rilevazione dell'evoluzione planimetrica della buca e del quantitativo di materiale in arrivo verrà realizzata mediante l'utilizzo di apposita strumentazione che consentirà di rilevare nel dettaglio dei profili longitudinali e trasversali della trappola; questa fase non è però contemplata all'interno del finanziamento oggetto alla base del presente progetto. La buca sarà costituita solamente da uno scavo in terra senza alcuna struttura definitiva, e semplicemente delimitata mediante la posa di picchetti di fede in corrispondenza dei vertici dello scavo.

Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alle tavole *Tav. 3.1, Tav. 3.2 e Tav. 3.3 Comune di Verano e Carate Brianza - intervento 2 e 3.*

2.1.4. Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4

In questo caso l'intervento 4 va ad interessare una serie di lavorazioni che hanno tra gli obiettivi quello di rinaturalizzare l'alveo del Lambro in un tratto ampiamente compromesso e quello di



garantire la sicurezza idraulica dell'area. In particolare le lavorazioni previste per questo intervento si dividono nei seguenti sotto-interventi:

- **Intervento 4.1.1:** Rimozione dei profili metallici della briglia a pettine esistente;
- **Intervento 4.1.2:** Abbassamento fondo gaveta della briglia a pettine esistente;
- **Intervento 4.2.1:** Sistemazione difesa di sponda in sinistra;
- **Intervento 4.2.2:** Sistemazione difesa di sponda in destra;
- **Intervento 4.3.1:** Formazione di un'area di golena in sinistra per trattenuta del materiale flottante;
- **Intervento 4.3.2:** Creazione protezione spondale con formazione rilevato arginale in terra armata e sponda in massi;
- **Intervento 4.4.1:** Riprofilatura ed adeguamento tracciato roggia esistente per ripristino funzionalità idraulica;
- **Intervento 4.4.2:** Sostituzione sottopasso stradale esistente con scatolare;
- **Intervento 4.5.1:** Consolidamento fondo alveo in massi ciclopici ancorati al fondo;
- **Intervento 4.5.2:** Pulizia alveo in sponda sinistra.

Partendo da monte il primo intervento consiste nel tagliare i profili IPE dell'attuale briglia che fuoriescono dal lato sinistro del coronamento della briglia stessa e che ad oggi danno luogo ad un continuo accumulo di sedimenti e di materiale flottante a monte di essa (intervento 4.1.1). Questa operazione non andrà a modificare la funzionalità dell'opera idraulica in termini di protezione dall'erosione del fondo e delle sponde. Inoltre sempre nel primo intervento verrà anche ribassato il fondo della gaveta della briglia, per un'altezza di circa 50 cm, in modo da far defluire in condizioni di magra, l'intera portata dalla gaveta.

Il secondo intervento interesserà l'area subito a valle della briglia e consisterà nella sistemazione di due tratti di sponda ammalorati, uno in destra idraulica ed uno in sinistra idraulica (interventi 4.2.2 e 4.2.1). In particolare la sistemazione della sponda in destra idraulica interesserà un tratto a valle della briglia della lunghezza complessiva di circa 40 m. L'intervento 4.2.2 prevede la demolizione dell'intero tratto ammalorato, che oggi è costituito per i primi 15 m circa da una sponda in massi e per i restanti 25 m circa da una sponda rivestita con delle lastre in calcestruzzo, per sostituirlo con una nuova sponda in massi, dotata di berma di fondazione, oggi assente. Il ciglio superiore della berma sarà posizionato alla quota del fondo alveo e si approfondirà di circa 1,5 m.



La mantellata, intestata sulla berma di fondazione, sarà sempre realizzata con massi di cava di volume non inferiore a 0,80 m³, avrà uno spessore minimo di 1 m, una pendenza del paramento di sponda di 2 su 3 e avrà l'attuale quota di sommità. Al fine di garantire un migliore inserimento ambientale e un adeguato mascheramento dell'opera la mantellata sarà intasata con terreno vegetale e successivamente inerbita con la tecnica dell'idrosemina. Lungo questo tratto, si provvederà a ripristinare anche lo sbocco di una roggia che corre in destra idraulica e che è probabilmente la causa del deterioramento della sponda stessa. Come descritto in seguito la soluzione progettuale adottata prevede l'allargamento della sezione di deflusso della roggia in modo da ridurre l'impatto della stessa sull'opera di difesa (intervento 4.4.3).

L'intervento 4.2.1 di sistemazione della difesa spondale in sinistra idraulica riguarderà la demolizione e rimozione dei lastroni in calcestruzzo che rivestono attualmente un tratto di sponda lungo circa 135 m che, come anticipato nel paragrafo precedente, presentano dei punti di instabilità localizzata e saranno sostituiti da una scogliera in massi. La riprofilatura di sponda verrà realizzata mediante le tecniche di ingegneria naturalistica e prevede la posa di una berma di fondazione, oggi del tutto assente, realizzata con massi di cava di volume non inferiore a 0,80 m³; il ciglio superiore della berma sarà posizionato alla quota del fondo alveo e si approfondirà di circa 1,5 m. La mantellata, intestata sulla berma di fondazione, sarà sempre realizzata con massi di cava, avrà uno spessore minimo di 1 m, una pendenza del paramento di sponda 2 su 3 e raggiungerà in sommità una quota inferiore rispetto all'attuale altezza del ciglio dei lastroni in calcestruzzo e pari a 209,62 m s.l.m. Per un migliore inserimento ambientale e per garantire un adeguato mascheramento dell'opera la mantellata sarà intasata con terreno vegetale e successivamente inerbita con la tecnica dell'idrosemina.

In sinistra idraulica, oltre all'intervento 4.2.1 di riprofilatura spondale con formazione di una scogliera, verrà anche realizzato un allargamento al fine di creare un'area di golena avente una curvatura di lunghezza massima pari a circa 40 m ed una superficie di circa 2000 m² (intervento 4.3.1). L'area di golena, che avrà fondo scavo a quota 209,62 m s.l.m., avrà principalmente una finalità di sicurezza idraulica, in quanto servirà da un lato ad allargare la sezione idraulica del Lambro e dall'altra a trattenere il materiale flottante trascinato dalla corrente che oggi viene trattenuto dalla briglia a pettine. In particolare l'area di progetto è stata dimensionata in modo da non alterare il deflusso del fiume in condizioni di ordinarie, durante le quali il Lambro transiterà



esclusivamente in alveo, e allagherà l'area di golena in caso di piene con tempo di ritorno circa annuale. Per maggiori dettagli si rimanda alla relazione tecnica allegata al presente progetto.

L'area di golena sarà delimitata da un argine in terra armata (intervento 4.3.2), protetto al piede da una sponda in massi avente un'inclinazione a 45°. La quota di sommità dell'argine è stata dimensionata al fine di garantire un franco di 1 m rispetto al livello idrico corrispondente alla piena di riferimento storica, che in questo caso è data dalla quota dedotta dallo studio di fattibilità dell'AdB nelle condizioni di progetto pari a 211,85 m s.l.m.; per maggiori dettagli si rimanda alla relazione tecnica allegata al presente progetto. Al fine poi di facilitare le operazioni di pulizia dell'area dal materiale flottante di deposito, è stata prevista una rampa di ingresso all'area, da cui si accede dall'attuale via per costa, che sarà chiusa ai non addetti alle manutenzioni da una sbarra orizzontale.

L'intervento 4.4.1 consiste poi nella riprofilatura di una roggia esistente in destra idraulica e la sistemazione dello sbocco a cielo aperto della stessa sulla sponda destra del Lambro, al fine di garantire il ripristino della propria funzionalità idraulica per un tratto di circa 131 m; oltre a ciò la roggia sarà anche interessata dall'intervento 4.4.2 che prevede la sostituzione dell'attuale tubazione che sottopassa la strada sterrata che attraversa la roggia con un manufatto in cls della lunghezza di circa 7,5 m. Per rendere agevoli le successive operazioni di manutenzione della roggia riprofilata l'intervento 4.4.1 prevede anche di delimitare il profilo della stessa mediante la posa di picchetti di fede posti a una distanza di 30 m ciascuno.

Come ultima lavorazione sarà prevista la sistemazione del fondo d'alveo subito a monte del ponte di Realdino, che come descritto nel paragrafo precedente, presenta una forte erosione sul fondo, dovuta probabilmente allo smantellamento nel secolo scorso di una traversa posta un chilometro più a valle che ha innescato fenomeni di erosione al fondo alveo. Concausa di questa erosione è la presenza della traversa a pettine che interferisce negativamente sul trasporto solido, generando, in questa zona critica, delle aree di cavitazione. A tal proposito l'intervento progettuale consiste nel posizionamento di massi ciclopici di volume non inferiore a 1 m³ ancorati sul fondo in ceppo, per ripristinare così la sezione originale dell'alveo (intervento 4.5.1); dall'altra nella pulizia del tratto di sponda sinistro, in prossimità del ponte, che si presenta attualmente occupato da un deposito di materiale (intervento 4.5.2). Il materiale litoide depositatosi lungo la sponda sinistra nel tratto subito a monte del ponte verrà restituito in alveo in un tratto a valle del ponte. Al fine poi di ottimizzare il naturale ripascimento dell'alveo a valle del ponte di Realdino, oltre alle



lavorazioni previste nell'intervento 5 saranno previste alcune operazioni di ricarica progressiva del fondo alveo attraverso il rilascio programmato del materiale di scavo derivante dalle lavorazioni degli interventi 4.

Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alle tavole *Tav. 4.1, Tav. 4.2, Tav. 4.3, Tav. 4.4 e Tav. 4.5 Comune di Carate Brianza - intervento 4.*

2.1.5. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Realdino: intervento 5

Anche in questo caso l'intervento va ad interessare una serie di sotto-interventi tra cui:

- **Intervento 5.1:** Realizzazione di una soglia in massi nel tratto subito a valle del ponte di Realdino;
- **Intervento 5.2:** Realizzazione di una soglia in massi nel tratto compreso tra il ponte di Realdino e il ponte della S.p. 6;
- **Intervento 5.3:** Realizzazione di una soglia in massi a valle del ponte della S.P. 6.

Il primo sotto-intervento previsto (intervento 5.1) va a completare quanto realizzato nell'intervento precedente con l'obiettivo di sistemare il fondo dell'alveo nel tratto subito a valle del ponte di Realdino. L'intervento consiste nella realizzazione di una soglia in massi posizionata circa 5 m a valle del ponte di Realdino in grado di indurre a tergo la sedimentazione di materiale e recuperare i tratti interessati dall'erosione del fondo. La soglia in pietrame verrà realizzata mediante l'ancoraggio sul fondo di massi ciclopici di volume non inferiore a 1 m^3 e sarà dimensionata per avere una larghezza pari alla sezione dell'alveo, circa 20 m, una lunghezza di circa 2 m ed un'altezza pari alla minima altezza necessaria a raggiungere la quota a cui è posto il piede della sponda che corre parallela a via Isonzo, in questo caso pari a 207,02 m s.l.m.

Gli altri sotto-interventi (5.2 e 5.3) consistono anch'essi nella realizzazione di altre due soglie in massi più a valle lungo l'asta del fiume posizionate rispettivamente a 120 m dall'asse della prima rampa e a circa 180 m dall'asse della seconda rampa. Anche queste due soglie in pietrame verranno realizzate mediante l'ancoraggio sul fondo di massi ciclopici di volume non inferiore a 1 m^3 e saranno dimensionate per avere una larghezza pari alla sezione dell'alveo, rispettivamente pari a circa 16 m e 12 m, una lunghezza di circa 2 m ed un'altezza pari alla minima altezza necessaria a raggiungere la quota a cui è posto il piede della sponda che corre parallela a via Isonzo, in questo caso pari rispettivamente a 206,81 m s.l.m e a 205,41 m s.l.m. Queste altre due



soglie serviranno principalmente a risolvere il problema della mancanza di deposito di materiale lungo il piede di sponda, in destra idraulica, che corre parallelo alla via Isonzo. La progettazione delle soglie ha infatti come obiettivo quello di favorire il ripristinarsi delle quote originarie del fondo del piede arginale, mediante il progressivo accumulo di sedimento a monte. Tale intervento sarà risolutivo rispetto ad una situazione ad oggi critica, che vede sempre più il rischio dello scalzamento del piede di sponda, un tempo protetto dalla presenza di una traversa subito a valle del ponte della S.P.6, che garantiva l'accumularsi del materiale lungo tutto il tratto a monte (Figura 2 e Figura 3), così come dimostrato nella relazione tecnica allegata al presente progetto.

Anche in questo caso una parte del materiale necessaria ad un primo rinterro del piede di sponda sarà ricavata dalle lavorazioni di scavo previste per l'intervento 4.

Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alle tavole *Tav. 5.1 e Tav. 5.2 Comune di Carate Brianza - intervento 5.*



Figura 2 – Vista in primo piano della traversa sul Lambro in Comune di Carate Brianza

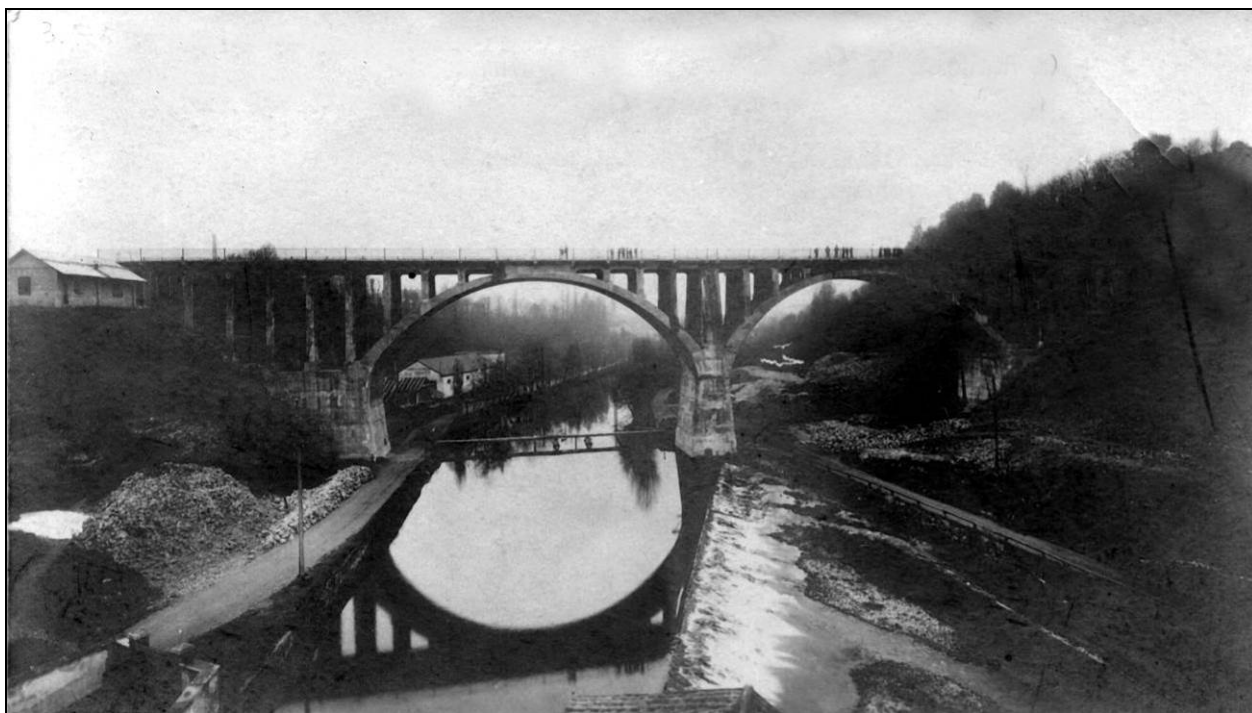


Figura 3 – Vista verso valle del Lambro con la traversa a valle del ponte della S.P.6

2.1.6. Comune di Sovico: intervento 6

L'intervento in Comune di Sovico si articola nei seguenti sotto-interventi:

- **Intervento 6.1:** Sistemazione rampa traversa esistente;
- **Intervento 6.2:** Sistemazione sponda esistente.

L'intervento 6.1 consiste nella sistemazione del tratto crollato di rampa della traversa di Canonica lungo circa 5 m che dà luogo a dei problemi di stabilità lungo l'argine in sponda destra del fiume. In particolare verranno posizionati sul fondo massi ciclopici di volume non inferiore a 1 m^3 in modo da creare una conformazione tale da ricreare la porzione di scivolo mancante.

L'intervento 6.2 invece consiste nella riprofilatura del tratto di sponda in destra subito a valle del salto della traversa per un tratto complessivo di circa 5 m finalizzato alla messa in sicurezza del sentiero che corre parallelo alla sponda e che è stato interessato da recenti cedimenti.

La riprofilatura verrà realizzata dapprima mediante la posa sul piede di sponda di massi ciclopici di volume non inferiore a 1 m^3 e successivamente attraverso la risagomatura della scarpata con materiale misto di cava fino al raggiungimento in quota del sentiero esistente.



Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alle tavole *Tav. 6.1 e Tav. 6.2 Comune di Sovico - intervento 6.*

2.1.7. Comune di Villasanta: intervento 7

L'intervento in Comune di Villasanta interessa l'area a valle dello scarico consortile ed in particolare consiste nella pulizia ed allontanamento di circa 160 m³ di materiale di deposito trasportato dal fiume. In questo caso, diversamente da quanto previsto per gli interventi precedenti, tutto il materiale derivante dalla manutenzione verrà smaltito in discarica.

Per ulteriori dettagli dell'intervento, si rimanda alla tavola *Tav. 7 Comune di Sovico - intervento 7: planimetria di progetto.*



3. RELAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA

3.1. STUDI PREGRESSI E DATI DISPONIBILI

Prima di procedere con l'esecuzione delle verifiche idrauliche è importante ricordare che il fiume Lambro è stato già oggetto in passato di studi e considerazioni rivolti sia al suo comportamento idraulico sia alla qualità delle sue acque. In particolare, rivolgendo l'attenzione soprattutto ad un ambito puramente idrologico e idraulico, gli atti che si sono susseguiti negli anni passati possono essere qui brevemente riassunti:

- Sistemazione del fiume Lambro proposta dal "Comitato Coordinatore per le Acque della Provincia di Milano" del 1937;
- "Proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle", detto "Piano Lambro" – Provincia di Milano, 1986;
- Progetto esecutivo per i "Lavori di sistemazione delle opere idrauliche del Lambro Settentrionale nel tronco compreso tra il ponte dell'autostrada MI-BG ed il ponte di innesto alla tangenziale est di C.na Gobba nei comuni di Brugherio e Milano" del Magistrato per il Po di Parma – 1989 ÷ 1997.
- "Progetto Preliminare di sistemazione del fiume Lambro a monte di Villasanta" di competenza della Regione Lombardia, datato 1998;
- "Progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Po e adottato nel 2001.

A seguire, in seguito all'evento alluvionale del novembre 2002, è stato predisposto uno "Studio di fattibilità della sistemazione idraulica dei corsi d'acqua naturali e artificiali all'interno dell'ambito idrografico di pianura Lambro – Olona (dicembre 2003)" che identifica le criticità idrauliche esistenti lungo il corso d'acqua e, alla luce degli effetti generati dall'evento dell'autunno 2002, ne individua una compiuta soluzione.

Successivamente, nel mese di Marzo 2004, è stata adottata la "Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi" che sostanzialmente ha recepito e fatto propri gli esiti del citato Studio di Fattibilità.



Altre informazioni utilizzate per svolgere il seguente studio idrologico – idraulico sono state desunte:

- dalla tesi di laurea magistrale al Politecnico di Milano dell'Ing. Chiara Vellani, redatta con il supporto del Dipartimento di Riqualificazione Fluviale del Parco della Valle del Lambro, dal titolo *"Studio del sistema delle aree di laminazione lungo il Lambro sublacuale ed affluenti finalizzata alla stesura del protocollo di gestione integrato per la difesa idraulica della valle e della città di Monza"* (A.A. 2012-2103);
- dal progetto definitivo *"Area di laminazione di Inverigo – Nibionno – Veduggio con Colzano, interventi di regolazione idraulica"* redatto su commissione del Parco Regionale della Valle del Lambro dallo studio Rosso Ingegneri Associati di Torino nel 2014.

3.2. "PROGETTO DI PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO"

Il "progetto di Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico" (PAI) ha lo scopo di assicurare, attraverso la programmazione di opere strutturali, vincoli, direttive, la difesa del suolo rispetto al dissesto di natura idraulica e idrogeologica e la tutela degli aspetti ambientali ad esso connessi.

Lungo l'asta del fiume Lambro sono state individuate le seguenti situazioni di squilibrio:

- instabilità morfologica dell'assetto planimetrico e altimetrico dell'alveo in relazione ai fenomeni di erosione spondale e di fondo, che si manifestano a danno delle opere di difesa e delle infrastrutture di attraversamento;
- elevato grado di artificializzazione del corso d'acqua nell'attraversamento dei territori urbanizzati, fino a Milano, in relazione alla riduzione delle capacità di laminazione;
- riduzione della sezione disponibile per il deflusso delle piene, per la presenza di localizzate formazioni di deposito alluvionale e per l'inadeguata altezza dell'intradosso di numerose infrastrutture di attraversamento, in particolare tra Merone e Linate;
- sistema difensivo frammentato e inadeguato al contenimento dei livelli idrici di piena. Monza, la periferia orientale e sud-orientale di Milano e il Lodigiano sono le zone maggiormente interessate da esondazioni che hanno per lo più carattere localizzato.



3.2.1. Stato di fatto

E' stato l'evento meteorico verificatosi alla fine del mese di novembre del 2002 ad avviare l'elaborazione di uno studio di fattibilità di sistemazione idraulica del fiume Lambro: esso ha infatti provocato esondazioni estese in alcuni tratti dell'asta del Lambro, in modo particolare nei comuni posti sulle rive del lago di Pusiano, a Carate Brianza, Villasanta, nel centro storico di Monza, nel Comune di Cologno Monzese e a Milano (Parco Lambro).

E' importante evidenziare come il fiume Lambro risulti attualmente caratterizzato da una considerevole complessità legata principalmente ad una storica e continua azione modificativa dell'uomo tesa da un lato allo sfruttamento della risorsa idrica e dall'altro alla difesa dalle piene.

A fronte di tale situazione, l'Autorità di Bacino del Po ha ritenuto necessario procedere ad un'analisi idraulica a scala di bacino che tenesse in conto le caratteristiche, le criticità e le potenzialità di ogni tratto dell'asta, al fine di raggiungere un assetto complessivo in grado di porre in sicurezza le zone oggi soggette a rischio, senza tuttavia indurre impatti insostenibili sul territorio.

Nella pagina seguente viene riportata una schematizzazione del fiume nel tratto analizzato dallo studio di fattibilità: in particolare sono riportate le caratteristiche principali dei bacini afferenti e valori delle portate al colmo duecentennali a monte e a valle delle varie confluenze.



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

DIPARTIMENTO DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

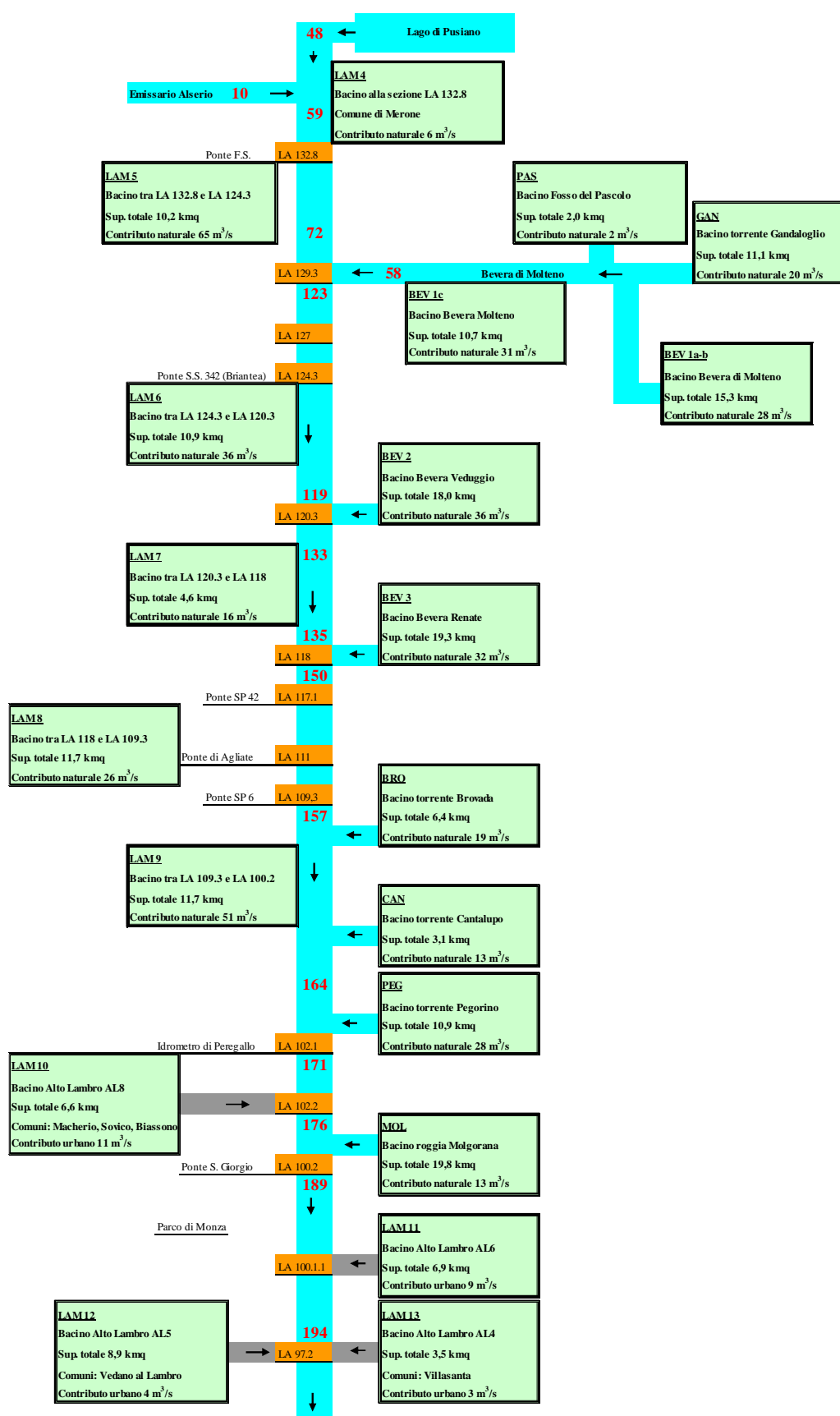


Figura 4 – Schema idrografico del fiume Lambro nel tratto d'interesse



3.2.2. Assetto di progetto

Per quanto sopra brevemente riassunto, gli studi che si sono susseguiti nel tempo per la soluzione dell'ambito milanese hanno sempre individuato soluzioni volte a ridurre pesantemente i deflussi alle porte della città. E' ormai chiaro da anni, infatti, il problema dell'insufficienza dei tratti vallivi del corso d'acqua e come tale problema debba essere risolto mediante l'azzeramento dei deflussi da monte attraverso la formazione di nuove laminazioni, ambientalmente e territorialmente compatibili.

Come infatti indicato dall'Autorità di bacino del Po, tenuto conto che l'intero sistema di difese idrauliche dell'asta fluviale deve essere dimensionato, in coerenza con gli obiettivi generali del P.A.I. e con l'assetto complessivo dell'asta, con riferimento a una piena di progetto con tempo di ritorno di 200 anni, si ha che le metodologie di intervento, in grado di tenere in conto tali maggiori criticità, sono le seguenti:

- regolazione del lago di Pusiano;
- aumento, come già accennato, della capacità di laminazione all'interno del bacino (asta fluviale e affluenti), in modo da ridurre opportunamente in relazione agli afflussi ed alla sostenibilità della soluzione, l'entità delle portate;
- mantenimento delle aree di allagamento naturale che interessano zone golenali;
- rimozione dei manufatti di attraversamento che ostacolano il deflusso di piena e inducono allagamenti in zone non compatibili;
- riduzione delle portate scaricate dalle reti di drenaggio urbano;
- aumento della capacità idraulica dell'alveo attraverso opere locali.

In funzione dei sopracitati criteri di sistemazione è stata individuata la miglior soluzione di assetto idraulico attraverso una procedura di verifica di diversi scenari di sistemazione.

I risultati ottenuti hanno individuato il seguente assetto di progetto come il più idoneo per la messa in sicurezza dell'intera asta fluviale:

- regolazione del lago di Pusiano ($10\,000\,000\text{ m}^3$), mediante il recupero del "Cavo Diotti";
- casse di espansione sugli affluenti di sinistra:
 - a) Merone sulla Bevera di Molteno ($1\,400\,000\text{ m}^3$ complessivi)
 - b) Molteno sul Gandaloglio
 - c) Briosco sulla Bevera di Renate ($500\,000\text{ m}^3$)



- conservazione della capacità di laminazione naturale: area di Inverigo (800 000 m³), Parco di Monza, zona di Monza tra Villorresi e A4, Parco Lambro, Parco Agricolo Sud Milano;
- argini, con funzione di protezione degli abitati, individuati, per posizione e tracciato, dalla fascia B di progetto del presente Piano stralcio;
- by-pass di Monza e di Milano;
- riprofilatura dell'alveo a Milano da Ortica a Bolgiano (raddoppio alveo e abbassamento alcune traverse);
- realizzazione di vasche di laminazione sui collettori fognari;
- interventi di adeguamento delle infrastrutture viarie interferenti;
- adeguamento e demolizione di traverse;
- modifica nodo idraulico Lambro-Naviglio Martesana.

3.3. IDROLOGIA

La determinazione delle portate di riferimento per il dimensionamento delle opere in progetto è stata condotta attraverso la consultazione degli studi pregressi citati nel precedente capitolo.

3.3.1. Portate di piena del PAI

Nell'allegato alla Relazione descrittiva della "Variante al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) Fasce fluviali del fiume Lambro nel tratto dal Lago di Pusiano alla confluenza con il deviatore Redefossi", predisposta dall'Autorità di Bacino del fiume Po, sono resi disponibili i valori attualmente vigenti delle portate della piena di progetto riferite a diverse sezioni significative del fiume Lambro.

Le sezioni d'interesse per il seguente studio idraulico sono le seguenti:

- la LA 111.1.1 e LA 110.1 per quanto riguarda le opere progettate nel Comune di Verano Brianza (intervento 3);
- da LA 110.1 a LA 109.2 bis per quanto riguarda le opere progettate nel Comune di Carate Brianza (interventi 4 e 5).

Di seguito sono riportati i valori delle portate riferite allo stato attuale e all'assetto di progetto:



Sezione	Prog	Descrizione	Portata idraulica stato attuale (T=200)	Portata idraulica assetto progetto completo (T=200)
			[m ³ /s]	[m ³ /s]
LA 111.1.1	39767		154,53	90,28
LA 110.1	40522		155,43	91,80
LA 110	40785		155,64	92,15
LA 109.4	40947	Ponte Via Grotte - Carate Brianza	155,73	92,33
LA 109.4 bis	40954	Ponte Via Grotte - Carate Brianza	155,74	92,33
LA 109.3	41168		155,99	92,83
LA 109.2	41168	Ponte Via Da Vinci - Carate Brianza	156,02	92,88
LA 109.2 bis	41268	Ponte Via Da Vinci - Carate Brianza	156,02	92,88

Tabella 1 – Valori delle portate di piena stato attuale e assetto di progetto

Nella Figura 5 è riportato uno stralcio dei profili idraulici nelle sezioni di interesse ricavati dalla modellazione idraulica condotta dallo studio Paoletti per la redazione dello Studio di Fattibilità di supporto alla Variante P.A.I., dove sono riportati anche i livelli idrici calcolati per i valori corrispondenti alle piene di riferimento indicate.

3.3.2. Definizione delle portate di piena di riferimento

Non avendo a disposizione dati idrologici di dettaglio del tratto di fiume Lambro analizzato si ritengono pienamente attendibili i valori di portata pubblicati nel P.A.I.

Pertanto detti valori saranno assunti quale riferimento per l'esecuzione delle verifiche idrauliche e per il dimensionamento delle opere del presente progetto (Tabella 2).

Sezione	Descrizione	Portata idraulica stato attuale (T=200)	Portata idraulica assetto progetto completo (T=200)	
		[m ³ /s]	[m ³ /s]	
LA 111.1.1	traversa di Verano (monte)	154,49	90,21	Intervento 3
LA 110.1	pettine di Realdino (monte)	155,43	91,80	Intervento 4
LA 109.4	Ponte Via Grotte - Carate Brianza	155,73	92,33	Intervento 5

Tabella 2 – Portate di piena di riferimento assunte per le verifiche idrauliche

Si precisa che i valori di portata di progetto si riferiscono ad uno scenario cui corrisponde la completa realizzazione di tutte le opere di laminazione previste nel P.A.I..



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO
DIPARTIMENTO DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

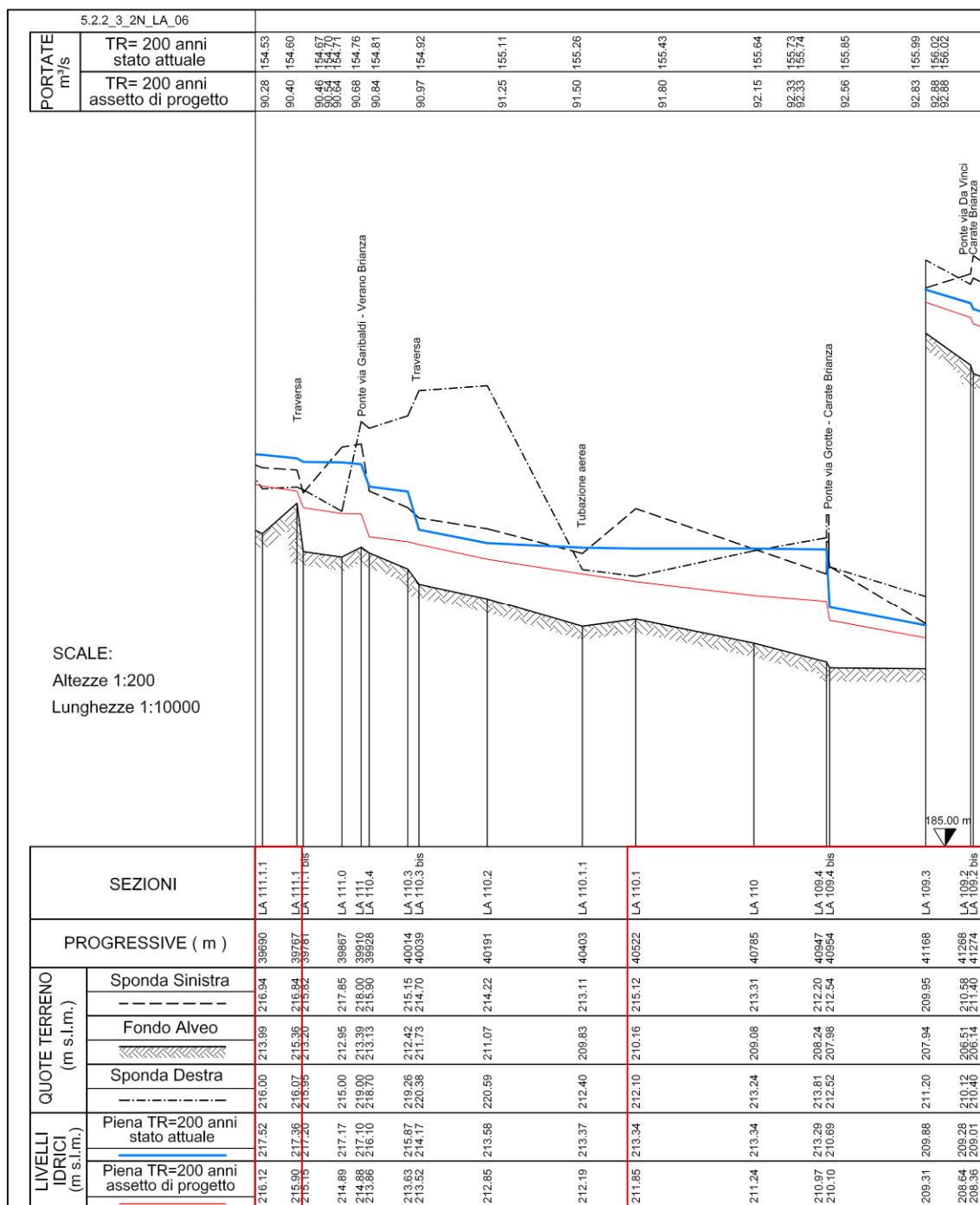


Figura 5 – Profili idraulici nelle sezioni di interesse

3.3.3. Definizione della portata di progetto

La funzione della golena costruita in sponda sinistra in località Porenzella di Carate Brianza è quella di adempiere alla funzione del rimosso pettine sulla briglia per intercettare il materiale flottante in arrivo con una piena ordinaria del fiume. È stato pertanto assunto di ipotizzare un tempo di ritorno per l'allagamento della golena sufficientemente basso e **pari ad 1 anno.**



Al fine di determinare la portata di riferimento con tempo di ritorno annuale, non essendo disponibili dati di letteratura, si è proceduto alla definizione di una legge che mettesse in relazione le portate al tempo di ritorno, a partire da massimi livelli idrometrici annuali misurati del Lambro. L'analisi probabilistica è stata impostata partendo da un campionario di dati misurati dei livelli idrometrici annuali della stazione di Lambrugo sul fiume Lambro. Tra questi sono stati individuati i massimi annuali (di seguito riportati) costituenti quindi la popolazione campionaria sulla base della quale è stata impostata l'analisi.

Stazione di Lambrugo	
Anno	Livello massimo annuale [m]
2007	1,59
2008	1,67
2009	3,38
2010	2,40
2011	1,91
2012	3,09
2013	1,79

Tabella 3 – Massimi livelli annuali del fiume Lambro nella stazione di Lambrugo

Attraverso la scala delle portate è stato possibile successivamente determinare le portate corrispondenti a tali valori del livello idrico.

Come noto, “le caratteristiche probabilistiche di questo insieme, cioè il legame tra i suoi valori e la probabilità che essi si verifichino, possono essere descritti tramite una funzione di distribuzione di probabilità $P(x)$, dove x è la variabile casuale considerata”: le portate massime annuali del fiume Lambro. Più precisamente quindi, $P(x_0)$ esprime la probabilità che un valore x_0 della variabile casuale non venga superato.

La funzione di distribuzione presa in considerazione è stata la funzione di distribuzione di Gumbel:

$$P(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}}$$

Dove i parametri α e u sono legati allo scarto quadratico medio σ e alla media μ della variabile x dalle relazioni:



$$\alpha = \frac{1.28}{s}$$

$$u = \mu - 0.45 \cdot \sigma$$

Ammettendo perciò che la media e lo scarto quadratico medio della variabile, cioè della sua popolazione, possano essere considerati coincidenti con i rispettivi valori m e s di un campione di valori estratto da tale popolazione, i parametri della distribuzione possono essere stimati dalla serie di osservazioni note, sostituendo m e s a μ e σ nelle precedenti equazioni.

Si riportano di seguito i valori di m , s , α e u calcolati:

Stazione di Lambrugo	
$\sigma = s$	52.33
$\mu = m$	1.34
α	0.02
u	110.38

Ordinando quindi in senso crescente la serie di dati delle portate massime annuali del Lambro, si calcolano le probabilità di non superamento:

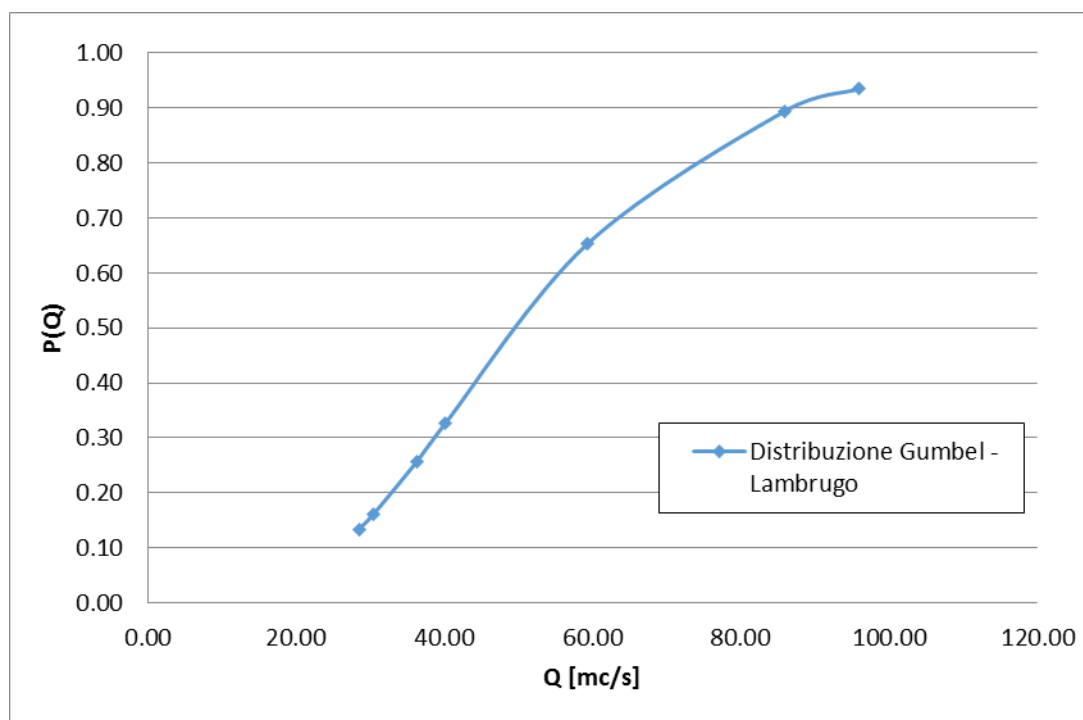


Figura 6 – Distribuzione di probabilità di Gumbel



Invertendo la funzione di probabilità di Gumbel, tenendo presente il legame esistente tra probabilità di non superamento P e tempo di ritorno T :

$$P = 1 - \frac{1}{T}$$

si può quindi calcolare la portata corrispondente ad un determinato tempo di ritorno T :

$$h_1 = u - \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]$$

Di seguito viene riportato il grafico mostrante l'andamento delle portate del Lambro in funzione del tempo di ritorno.

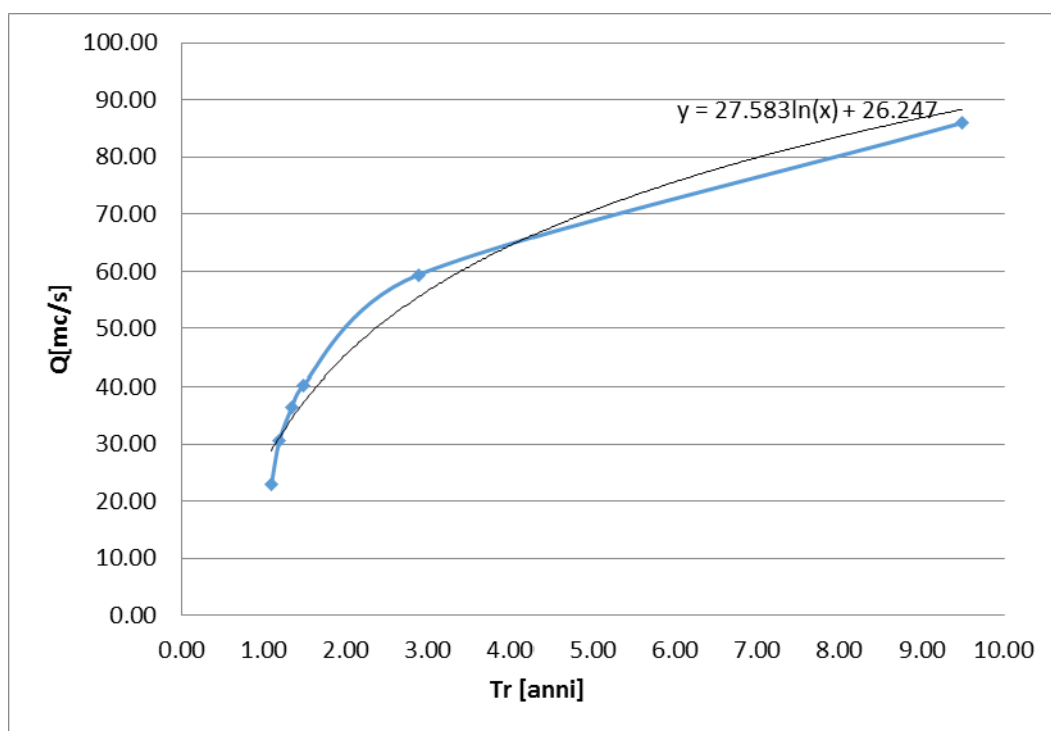


Figura 7 Andamento delle portate del fiume Lambro in funzione del Tempo di ritorno

L'analisi probabilistica restituisce un valore di portata con tempo di ritorno annuale del fiume Lambro nella stazione di Lambrugo di circa $26 \text{ m}^3/\text{s}$.



3.4. IDRAULICA

Il seguente studio idraulico, condotto in fase di redazione del progetto definitivo – esecutivo è stato svolto con l’obiettivo di dimensionare e verificare una parte degli interventi previsti dallo stesso. In particolare lo studio è stato realizzato per:

- verificare la quota in sommità della difesa spondale nel tratto subito a monte della traversa a Verano Brianza, intervento 2.
- dimensionare la quota di fondo dell’area di allargamento a valle della briglia a pettine di Realdino e la quota in sommità dell’argine in comune di Carate Brianza, intervento 4;
- verificare nel tratto di via Isonzo a Carate Brianza l’effetto della vecchia traversa posta a valle del ponte di via Da Vinci, intervento 5.

3.4.1. Modellazione numerica idraulica: descrizione del codice di calcolo

Le verifiche idrauliche e il dimensionamento delle opere in progetto sono state condotte grazie alla predisposizione di un modello numerico idraulico.

L’allestimento del modello è avvenuto mediante l’utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS River Analysis System, sviluppato dall’U.S. Army Corps of Engineering – Hydrologic Engineering Center. La versione del software utilizzata è la 4.1, aggiornata al mese di gennaio 2010.

HEC-RAS consente il calcolo idraulico monodimensionale di canali naturali e artificiali, sia in condizioni di moto permanente che di moto vario, tenendo conto dell’influenza sul moto di manufatti di vario tipo (ponti, tombini, briglie, sfioratori, luci servite da paratoie, ecc.) eventualmente presenti nel sistema. Possono essere modellati sia canali singoli che reti di canali naturali o artificiali, chiusi o aperti, con l’integrazione di profili di corrente lenta, veloce o di tipo “misto”.

I fondamenti teorici su cui si basa la modellazione numerica del codice di calcolo HEC-RAS sono riportati in Appendice.



3.4.2. Costruzione della geometria del modello di stato di fatto

La modellazione numerica sviluppata per il seguente studio adotta una schematizzazione monodimensionale del tratto di fiume Lambro compreso tra l'uscita del lago di Pusiano e il Parco di Monza.

L'asta principale del fiume è stata rappresentata attraverso l'adozione di 290 sezioni, assunte ortogonali alla direzione della corrente idrica, comprese tra:

- una sezione di monte (132.112): sezione di valle del ponte della SP41, a Merone, posta successivamente alla confluenza dell'emissario naturale del lago di Pusiano con l'emissario del lago di Alserio;
- una sezione di valle (96.34): situata nel Parco di Monza, subito a monte dell'ingresso del fiume nel centro urbano.

Tra queste la maggior parte sono state ricavate dallo Studio dell'Autorità di Bacino del Fiume Po del 2002, utilizzate allora per la modellazione di tutta l'asta fluviale del Lambro attraverso un diverso codice di calcolo; in aggiunta sono state introdotte alcune sezioni, sempre fornite dall'Autorità di Bacino ma antecedenti al lavoro di rilevamento utilizzato per lo Studio del 2002; infine, attraverso indagini in sito e rilievi topografici, sono state aggiunte e modificate alcune sezioni comprendenti manufatti di recente costruzione.

In particolare nel tratto compreso tra la briglia a pettine di Realdino e il ponte di via Da Vinci, avendo a disposizione un rilievo topografico di dettaglio, sono state inserite diverse sezioni a completamento del modello idraulico. Sono state aggiornate le sezioni del tratto in corrispondenza del pettine di Realdino e dell'area posta immediatamente a valle di esso e le sezioni tra il ponte di via Grotte e il ponte di via Da Vinci (Figura 8).

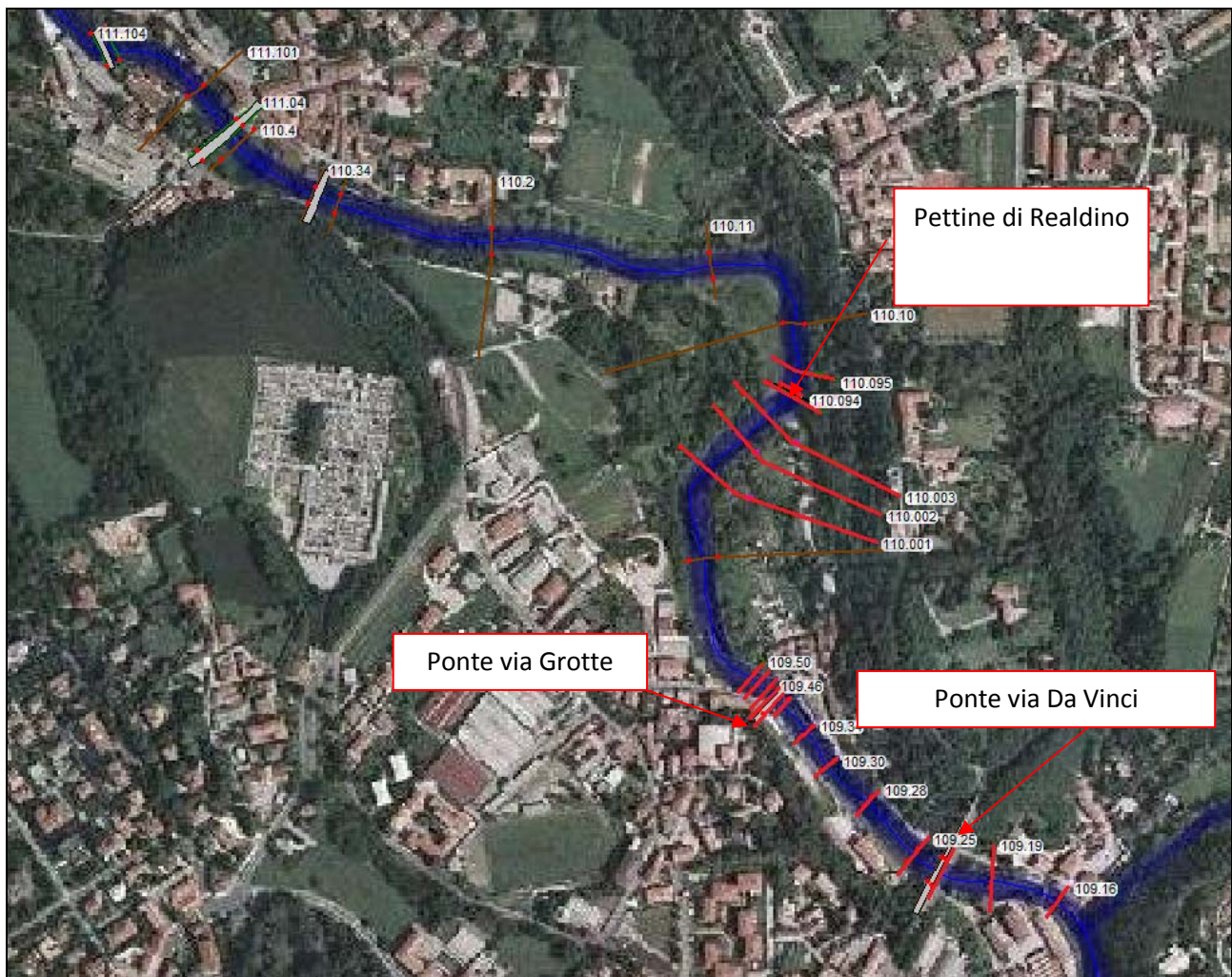


Figura 8 – Traccia delle nuove sezioni ad integrazione del modello idraulico

All'interno di ogni sezione è possibile tenere conto di ogni variazione della scabrezza, nelle golene o lungo l'alveo, attraverso l'utilizzo di diversi coefficienti di Manning: dove indicati, sono stati inseriti valori di scabrezza di Manning corrispondenti ai valori di Strickler impiegati dall'Autorità di Bacino nel suo Studio di Fattibilità, altrove invece sono stati inseriti valori dei coefficienti di scabrezza compresi nei ranges forniti da letteratura, cercando di rimanere coerenti con i valori impiegati dall'Autorità di Bacino.

Il modello conta in totale 10 ponti, comprendenti 3 attraversamenti stradali, 2 attraversamenti ferroviari, 2 attraversamenti pedonali e 15 traverse. A seguito dell'integrazione con il rilievo topografico è stata aggiornata la geometria del ponte di via Grotte e la geometria del manufatto del pettine di Realdino.

Infine, quale condizione al contorno di valle è stata imposta la pendenza media dell'alveo.



3.4.2.1. Verifica di congruenza con il modello dell'Autorità di Bacino

Al fine di verificare l'attendibilità del modello sviluppato per il seguente studio idraulico è stata effettuata una simulazione di stato di fatto in modo da poter confrontare i risultati con i medesimi ottenuti dallo studio dell'Autorità di Bacino.

Per effettuare tali valutazioni bisogna però tenere in considerazione le varie diversità presenti tra i due modelli.

Profilo idraulico e condizioni al contorno

La differenza fondamentale tra i due modelli risiede nel differente metodo di calcolo del profilo idraulico. Lo studio dell'Autorità di Bacino ha calcolato profili di moto vario mentre per il presente studio sono state simulate condizioni di moto permanente. I valori di portata utilizzati per le simulazioni sono quelli relativi alle portate di piena del P.A.I. come indicato nel paragrafo 3.3.

Sezioni

Il modello in HEC-RAS, adottato dagli scriventi, presenta un rilevante numero di sezioni fornite dall'Autorità di Bacino del Po ma ottenute da studi effettuati successivamente la redazione dello Studio di fattibilità del 2003. A seguito di rilievi in sito, sono stati inserite opere di recente costruzione: la traversa a Costa Lambro, un attraversamento pedonale, il ponte di Triuggio, un attraversamento stradale e il ponte di via Galileo Galilei a Biassono.

Inoltre nel tratto interessato dalle opere in progetto le sezioni sono state aggiornate con le geometrie ricavate dal rilievo topografico. Occorre sottolineare in particolare che per quanto riguarda il tratto in corrispondenza del pettine di Realdino le sezioni attuali dell'alveo risultano più larghe rispetto a quelle del modello dell'AdB, mentre per quanto riguarda le sezioni a valle del ponte di Via Grotte il fondo dell'alveo dedotto dal rilievo risulta più basso di circa 2 m.

Scabrezze

In assenza di indicazioni riguardo le scabrezze utilizzate lungo le aree golenali di alcune sezioni nel modello di AdB, sono stati utilizzati valori di scabrezza coerenti con quelli utilizzati a monte e a valle di queste. Ad ogni modo, considerando portate duecentennali, variazioni dei suddetti valori comportano variazioni trascurabili sulle altezze d'acqua.



Alla luce di queste informazioni è quindi lecito aspettarsi variazioni dei livelli idrici risultanti lungo il tratto in esame rispetto ai livelli riportati nello Studio di Fattibilità di supporto alla Variante del P.A.I.

In generale dall'osservazione dei risultati ottenuti puntualmente sulle sezioni in corrispondenza del tratto dove sono previste le opere, si sono ricavati valori dei livelli diversi da quelli ottenuti dallo Studio di Fattibilità. La differenza diventa irrisoria man mano che ci si allontana dal tratto in esame. Tale diversità è dovuta all'aver modificato la geometria dell'alveo e delle sezioni golenali che risultano più larghe e con una quota di fondo minore.

Sebbene i risultati forniti dall'implementazione del modello non siano sempre aderenti ai risultati dell'AdB, il modello implementato può considerarsi attendibile e di conseguenza idoneo per la verifica e il dimensionamento delle opere in progetto.

3.5. Simulazioni effettuate

Le simulazioni idrauliche sono state effettuate per dimensionare l'allargamento a valle della briglia a pettine in Comune di Carate Brianza (intervento 4) e per verificare gli effetti, lungo viale Isonzo, della vecchia traversa che esisteva un tempo a valle del ponte di via Da Vinci in comune di Carate Brianza.

3.5.1. Comune di Verano Brianza: intervento 2

Per l'intervento di sistemazione e riprofilatura della sponda destra del Lambro in Comune di Verano Brianza è stato necessario verificare idraulicamente la quota in sommità della sponda. In particolare, trattandosi di interventi di manutenzione straordinaria, risulta sufficiente garantire le condizioni e il livello di sicurezza attualmente esistenti in tale tratto.

Per tale motivo la nuova sistemazione spondale garantirà una quota in sommità superiore e almeno pari al livello idrico calcolato per la piena di riferimento duecentennale dell'assetto di progetto dall'AdB, che è pari a 216,12 m s.l.m. nella parte di monte e 215,90 m s.l.m. in corrispondenza della sezione di valle. Ad ogni modo, per garantire un'ulteriore stabilità di sponda e una maggiore resistenza all'azione erosiva del fiume, la testa della sponda verrà rinforzata mediante la formazione di uno strato di terre armate oltre la quota di sommità della testa dell'argine attualmente esistente.



In Figura 9 è riportata a titolo di esempio la sezione di monte della sistemazione sponale, dove sono indicati i livelli idrici corrispondenti allo stato attuale e all'assetto di progetto del P.A.I.

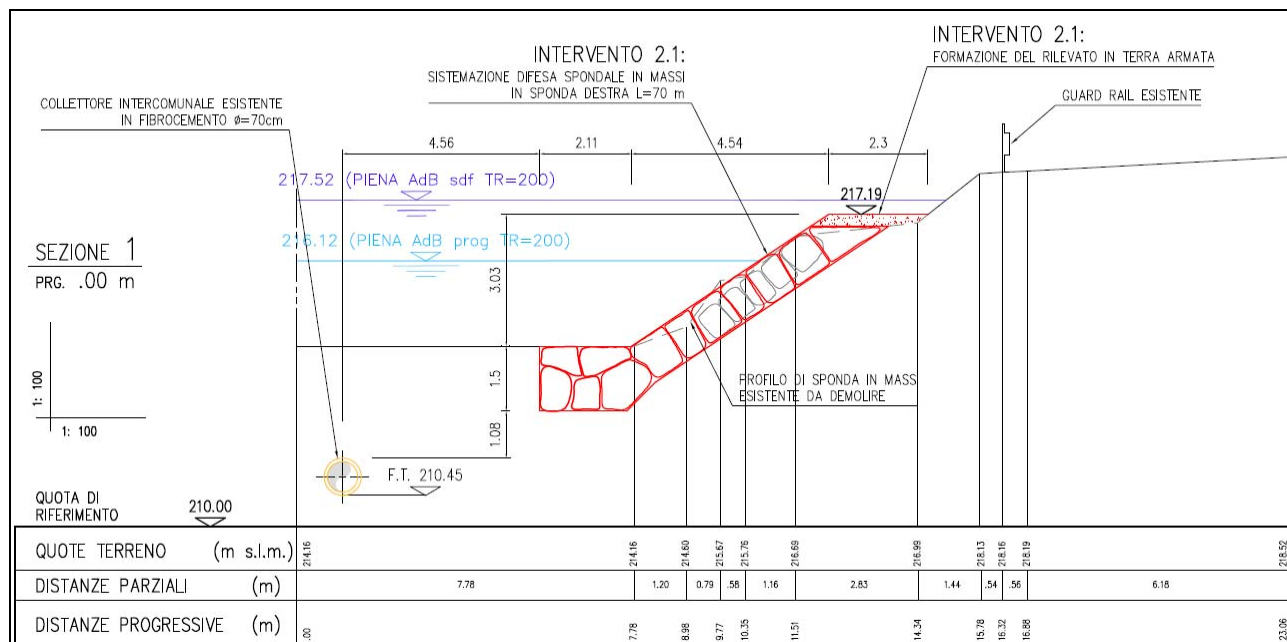


Figura 9 – Sezione di progetto (Intervento 2)

3.5.2. Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4

Per quanto riguarda l'intervento 4 sono stati modellati e simulati sia lo scenario di stato di fatto ricavato dall'aggiornamento del modello in HEC-RAS con il rilievo topografico sia lo scenario di progetto con la soluzione prevista dal presente definitivo-esecutivo.

3.5.2.1. Stato di fatto

È stata utilizzata la geometria descritta nel paragrafo §3.4.2 ed è stato calcolato un profilo idraulico in condizioni di moto uniforme. Come portata in ingresso è stato utilizzato il valore della piena di riferimento indicata nel P.A.I., corrispondente ad un tempo di ritorno di 200 anni, pari a $155,43 \text{ m}^3/\text{s}$.

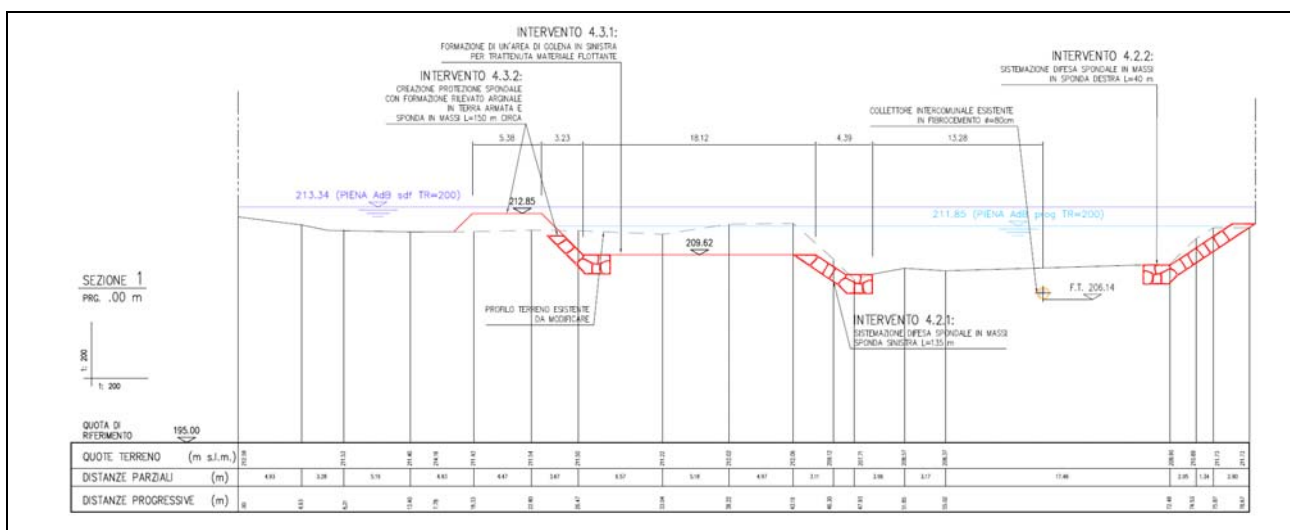
I risultati mostrano una sostanziale differenza dei livelli tra la simulazione e i dati dedotti dallo studio di fattibilità. In corrispondenza della sezione LA 110.1 il livello risulta più basso di circa 90 cm rispetto a quello dell'Autorità di Bacino. La differenza si attenua man mano che ci si allontana dal tratto interessato dal progetto. Tale diversità, come sopra accennato, è conseguenza del fatto



che lo studio dell'Autorità di Bacino, redatto nel 2003, non tiene conto né della presenza del pettine, né della nuova geometria delle sezioni d'alveo.

3.5.2.2. Progetto

La geometria dell'area è stata dedotta dalle tavole di progetto e la quota in sommità dell'argine è stata posta a 212.85 m s.l.m., ovvero pari al livello di piena duecentennale dell'assetto di progetto del P.A.I. più 1 m di franco idraulico. La scelta di considerare, come livello per il dimensionamento delle opere, il livello di piena duecentennale dell'assetto di progetto è stata fatta partendo dal presupposto che tali opere appartengono ad un progetto di manutenzione straordinaria. Ciò implica solamente l'obbligo di non diminuire il livello di sicurezza attualmente esistente. La quota di progetto ipotizzata rispetta in pieno tale vincolo aumentando addirittura il livello di sicurezza del tratto interessato.



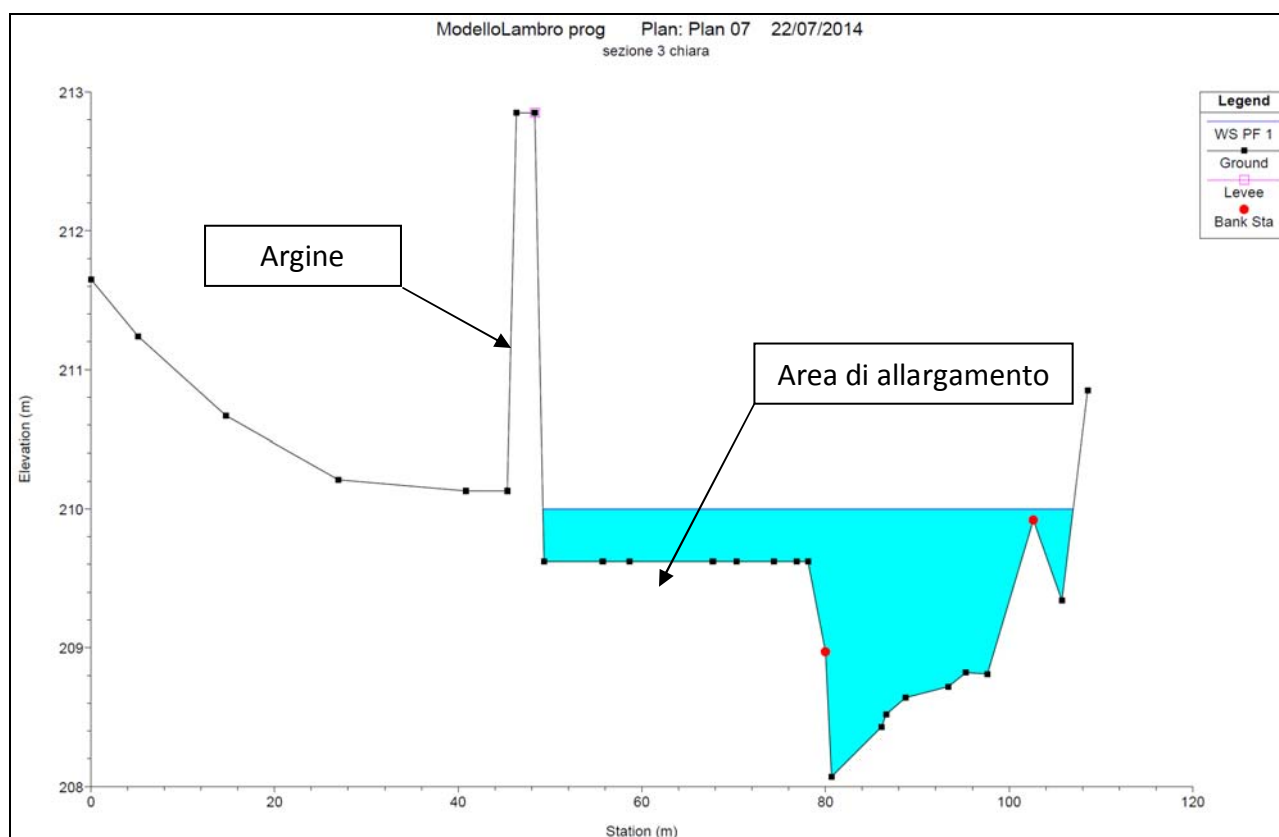


Figura 11 – Sezione 110.002: livello di piena con tempo di ritorno annuale

3.5.3. Comune di Carate Brianza a valle del ponte di Realdino: intervento 5

Le simulazioni idrauliche effettuate per l'intervento lungo via Isonzo sono volte alla verifica dell'effetto sui livelli idrici di una vecchia traversa posta a valle del ponte di via Da Vinci, il cui smantellamento ha probabilmente abbassato i livelli idrici lungo la via Isonzo, provocando fenomeni di erosione in corrispondenza del piede di sponda in destra idraulica.

La progettazione delle rampe servirà a favorire il ripristinarsi delle quote originarie del fondo del piede arginale, mediante il progressivo accumulo di sedimenti e detriti a monte.

Per la modellazione idraulica sono state aggiornate le sezioni idrauliche del tratto di via Isonzo, con i dati del rilievo topografico, ed è stata inizialmente simulata una condizione di stato di fatto con la portata di riferimento della piena duecentennale pari a $155.99 \text{ m}^3/\text{s}$ (sezione LA 109.30). I livelli risultanti dalla simulazione sono paragonabili ai livelli dichiarati dall'Autorità di Bacino.

Successivamente è stata inserita la sezione corrispondente alla vecchia traversa, deducendone la geometria dalle foto storiche e dai rilievi effettuati. La quota in sommità della traversa è stata posta a 208,52 m s.l.m.



Per effettuare il confronto è stata inizialmente simulata la condizione di piena duecentennale con portata pari a $155,99 \text{ m}^3/\text{s}$; tale simulazione però non ha mostrato evidenti differenze in quanto i livelli sono talmente alti che gli eventuali effetti di soglie e traverse risultano trascurabili.

Si è deciso quindi di simulare una condizione ordinaria, ovvero con un valore di portata pari al valore della piena annuale (vedi paragrafo 3.3.3). Il calcolo del profilo idraulico, in condizioni di moto uniforme, restituisce valori nettamente diversi nelle due condizioni. Il livello risultante dal modello di stato di fatto è inferiore di circa 1,2 m rispetto al modello comprendente la vecchia traversa esistente.

In Figura 12 è riportato lo stralcio del profilo idraulico nel tratto di interesse che mostra la differenza di livelli tra i due scenari simulati.

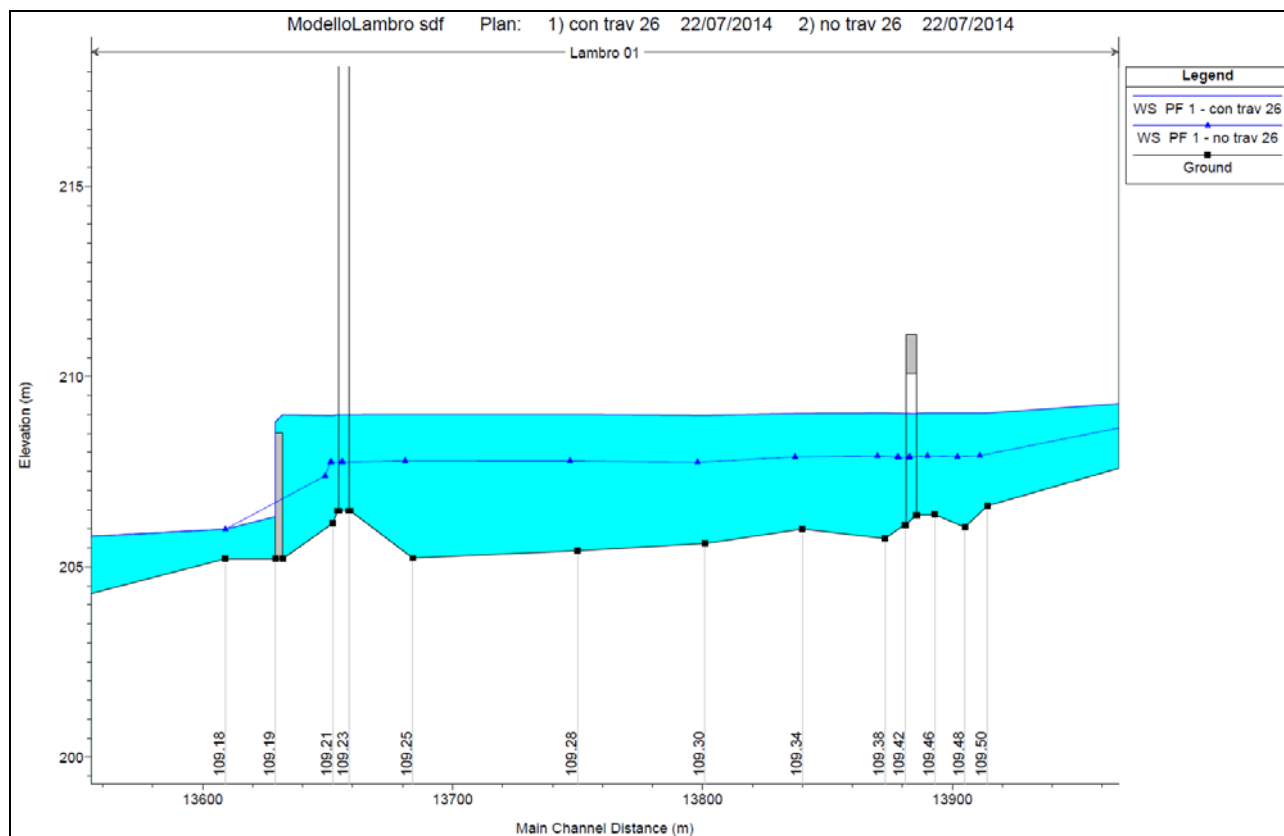


Figura 12 – Confronto del profilo idraulico tra la geometria di stato di fatto e la geometria comprendente la vecchia traversa

La modellazione numerica ha confermato quindi l'ipotesi che l'erosione e il mancato deposito di materiale lungo il piede di sponda, in destra idraulica, è sostanzialmente dovuto alla dismissione della traversa che un tempo proteggeva e garantiva l'accumularsi del materiale lungo tutto il tratto di monte.



4. RELAZIONE STRUTTURALE

Le opere soggette al dimensionamento strutturale sono:

- i muri di sponda da ripristinare a Verano (intervento 2) e da realizzare ex novo in Comune di Carate Brianza (intervento 4);
- lo scatolare per l'attraversamento della roggia in Comune di Carate Brianza (intervento 4).

4.1. DIMENSIONAMENTO DEI MURI DI SPONDA

La scelta delle dimensioni e del peso dei massi da utilizzare dipende dalle sollecitazioni meccaniche a cui vengono sottoposte (azione di trascinamento della corrente). La pendenza della sponda, sicuramente inferiore all'angolo d'attrito del materiale utilizzato, e la pezzatura media degli elementi lapidei costituenti la scogliera o la gettata devono essere determinate con i criteri dedotti dalla nota teoria dell'equilibrio limite, con le opportune correzioni per conteggiare l'incremento della mobilità dei massi su sponda inclinata.

Per la determinazione della dimensione media dei massi e, contemporaneamente, della pendenza media delle sponde in grado di costituire un giusto compromesso tra i vincoli areali della zona e le condizioni di stabilità dei singoli massi, si è fatto riferimento alle espressioni di Stevens et. al (1976), basate sull'analisi delle forze agenti sull'elemento solido in condizioni di equilibrio limite, con la correzione per la stabilità su sponda inclinata. Tali espressioni sono:

$$\sigma = \frac{0.30V^2}{(\gamma_s / \gamma - 1)gd_m} \quad (1)$$

$$\alpha = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\cos \lambda}{\frac{2 \operatorname{sen} \vartheta}{\sigma \operatorname{tg} \varphi} + \operatorname{sen} \lambda} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{1 + \operatorname{sen}(\alpha + \lambda)}{2} \quad (3)$$

$$C_s = \frac{\cos \vartheta \operatorname{tg} \varphi}{\sigma' \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{sen} \vartheta \cos \alpha} \quad (4)$$



nelle quali:

- d_m = diametro medio del masso [m];
- C_s = coefficiente di sicurezza al ribaltamento del masso rispetto al punto di rotazione (rapporto tra il momento della risultante delle forze stabilizzanti ed il momento della risultante delle forze ribaltanti);
- ϑ = pendenza della scarpata;
- φ = angolo di riposo in acqua dei massi;
- α = angolo che la direzione di caduta del masso forma con la linea di massima pendenza della scarpata;
- λ = angolo diedro tra il piano orizzontale ed il piano inclinato del fondo alveo ($\tan \lambda = i = \text{pendenza del fondo}$);
- σ = numero di stabilità del masso su sponda inclinata;
- σ' = numero di stabilità del masso sul fondo;
- γ_s = peso specifico del masso [N/m^3];
- γ = peso specifico dell'acqua [N/m^3];
- V = velocità della corrente agente sul masso [m/s];

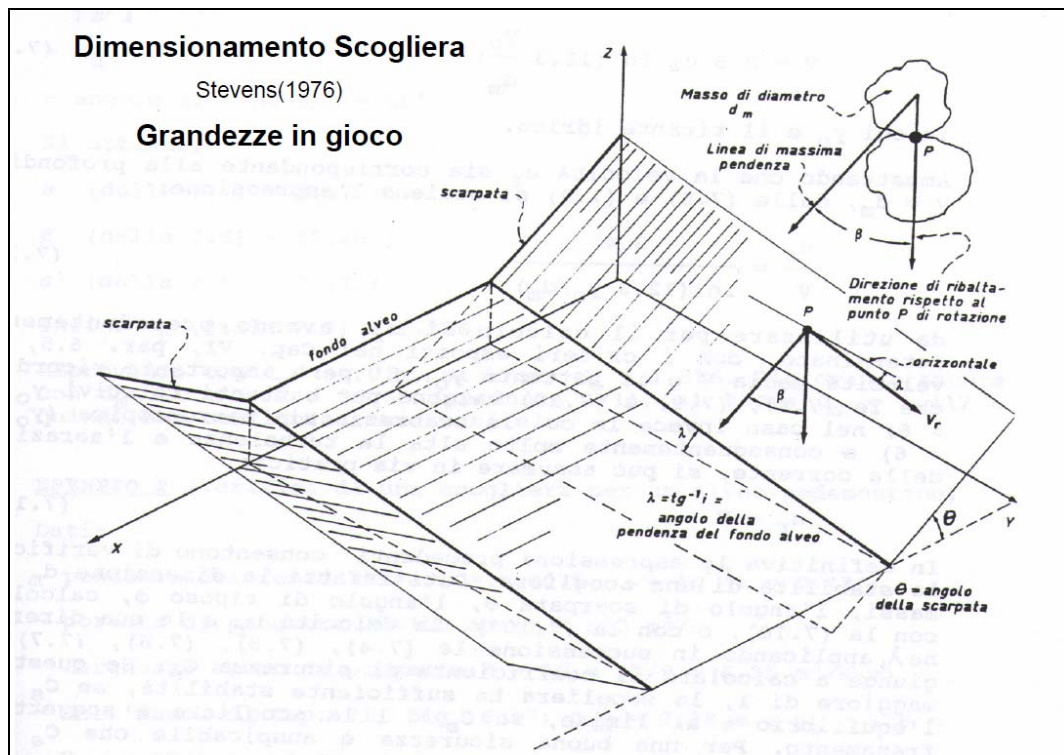


Figura 13 – Grandezze in gioco equazioni di Stevens (1976)



Perché la configurazione della difesa sia a favore di sicurezza, il coefficiente C_s deve risultare almeno pari a 1,3.

4.1.1. Comune di Verano Brianza: intervento 2

L'intervento consiste nella sistemazione del tratto di sponda ammalorato, posizionato in destra idrografica del tratto in oggetto, mediante la riprofilatura della sponda per una lunghezza complessiva di circa 70 metri, attraverso l'impiego di tecniche di ingegneria naturalistica.

La riprofilatura verrà realizzata mediante una berma di fondazione, ad oggi del tutto assente, realizzata con massi di cava; il ciglio superiore della berma sarà posizionato alla quota del fondo alveo e si approfondirà di circa 1,5 m, la larghezza trasversale della berma sarà invece di circa 2 m. La mantellata, sempre realizzata in massi ciclopici, intestata sulla berma di fondazione, avrà uno spessore di circa 1 m.

Per la progettazione in esame, le condizioni più gravose, sono quelle date dalla configurazione di progetto duecentennale dello studio di fattibilità dell'AdB, per le quali si ha una velocità della corrente maggiore rispetto alla velocità nelle condizioni di stato di fatto); di seguito si riportano i dati di progetto:

i	=	0,00964
ϑ	=	33,69° (pari a una pendenza di 2 su 3)
V	=	3,13 m/s
φ	=	45°
γ_s	=	27 kN/m ³
γ	=	10 kN/m ³

Applicando in successione le espressioni dalla (1) alla (4), la configurazione stabile della difesa è stata trovata per un diametro medio teorico del masso $d_m = 1,18$ m ed una pendenza della sponda di 33,69° : in corrispondenza di tali valori, infatti, il coefficiente di sicurezza vale $C_s = 1,31$.

Al diametro medio $d_m = 1,18$ m corrisponde un volume minimo (calcolato come se il masso fosse sferico) di 0,85 m³ e quindi un peso pari a circa 2400 kg.

La difesa di sponda, pertanto, sarà costituita da massi di peso minimo di circa 2400 kg.



4.1.2. Comune di Carate Brianza a monte del ponte di Realdino: intervento 4

L'intervento consiste nella sistemazione di alcuni tratti di sponda ammalorati, a valle della briglia a pettine, mediante tecniche di ingegneria naturalistica, sia in destra che in sinistra idraulica.

La riprofilatura prevede la posa di una berma di fondazione, oggi del tutto assente, realizzata con massi di cava; il ciglio superiore della berma sarà posizionato alla quota del fondo alveo e si approfondirà di circa 1,5 m. La mantellata, intestata sulla berma di fondazione, sarà sempre realizzata con massi di cava, avrà uno spessore minimo di 1 m.

Per la determinazione della dimensione media dei massi e, contemporaneamente, della pendenza media delle sponde in grado di costituire un giusto compromesso tra i vincoli areali della zona e le condizioni di stabilità dei singoli massi, si è fatto riferimento alle espressioni di Stevens et. al (1976), basate sull'analisi delle forze agenti sull'elemento solido in condizioni di equilibrio limite, con la correzione per la stabilità su sponda inclinata.

Le condizioni più gravose, per questo intervento, sono quelle determinate dalla configurazione di stato di fatto dello Studio di Fattibilità dell'AdB; si ha infatti un valore di velocità della corrente maggiore rispetto a quello calcolato per la condizione di assetto di progetto.

I dati utilizzati per il dimensionamento sono i seguenti:

i	=	0,00411
θ	=	33.69° (pari a una pendenza di 2 su 3)
V	=	2,28 m/s
φ	=	45°
γ_s	=	27 kN/m ³
γ	=	10 kN/m ³

Applicando in successione le espressioni dalla (1) alla (4), la configurazione stabile della difesa è stata trovata per un diametro medio teorico del masso $d_m = 0.62$ m ed una pendenza della sponda di 33,69°: in corrispondenza di tali valori, infatti, il coefficiente di sicurezza vale $C_s = 1,31$.

Considerando però che la geometria delle sezioni con la quale è stato svolto il dimensionamento differisce in maniera notevole dalla geometria delle sezioni dedotta dal rilievo topografico, si ritiene corretto, a favore di sicurezza, utilizzare anche per questo intervento di sistemazione spondale, massi delle dimensioni calcolate per il precedente intervento.



In particolare, risultando un diametro medio del masso pari a 1,2 m , a cui corrisponde un volume minimo (calcolato come se il masso fosse sferico) di 0.85 m³, per tale lavorazione verranno impiegati massi di un peso minimo di circa 2400 kg.

4.2. DIMENSIONAMENTO DELLO SCATOLARE DI ATTRAVERSAMENTO

4.2.1. Normativa di riferimento

Nell'analisi e nelle verifiche della struttura si è tenuto conto delle seguenti normative:

- Legge 5 novembre 1971 n. 1086 (G. U. 21 dicembre 1971 n. 321) Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica
- Legge 2 febbraio 1974 n. 64 (G. U. 21 marzo 1974 n. 76) Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche
- C.N.R. n. 10024/1986 Analisi di strutture mediante elaboratore. Impostazione e Redazione delle relazioni di calcolo
- D. M. LL.PP. 11 marzo 1988 (G.U. 1 giugno 1988 n.127 - Suppl. Ord.) Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 20 marzo 2003 n. 3274 (G. U. 8 maggio 2003 n. 127 Suppl. Ord. n.72) Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica
- Decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 14 settembre 2005 (G.U. 222 del 23 settembre 2005 Suppl. n.159) Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 Aprile 2006, n. 3519 (GU n. 108 del 11.5.2006) "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone".
- Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008 (G.U. n. 29 del 4.2.2008 supplemento ordinario n. 30) "Norme tecniche per le costruzioni".



4.2.2. Descrizione dell'opera

La struttura oggetto della presente relazione è una passerella carrabile in conglomerato cementizio armato che si sviluppa su una campata di 6,30 metri, posta per l'attraversamento della roggia in località Porenzella nel Comune di Carate Brianza.

Il sistema strutturale è concepito, in favore di sicurezza, come una trave singola con schema appoggio-appoggio che costituisce il piano di camminamento e due piedritti che costituiscono le spalle.

Prestazioni attese (punto 2.4 dell'ntc 2008)

La struttura oggetto dell'analisi prevede un normale affollamento. Per la stessa si stima pertanto una vita nominale V_N di 50 anni. Sulla base di queste ipotesi la struttura è inquadrabile in una classe d'uso II. Definite la vita nominale e la classe d'uso della struttura si determina il periodo di riferimento dell'azione sismica:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50 \cdot 1,0 = 50 \text{ anni}$$

dove C_U è il coefficiente d'uso il cui valore varia in base alla classe d'uso secondo quanto riportato nella tabella 2.4.II. del D.M. 14/01/2008.

Azioni di calcolo per la passerella

Carichi permanenti G_1	Peso proprio degli elementi strutturali
Carichi permanenti non strutturali G_2	non presenti
Carichi variabili Q	
Carico carrabile	1000 daN/mq

4.2.3. Verifica dell'opera

I calcoli per il dimensionamento delle strutture sono stati condotti secondo i criteri della Scienza delle Costruzioni e, in particolare, il dimensionamento delle sezioni è stato condotto con il metodo semiprobabilistico agli stati limite mediante programma di calcolo.

Date le ridotte dimensioni dell'opera e le dimensioni, la verifica sismica viene omessa.

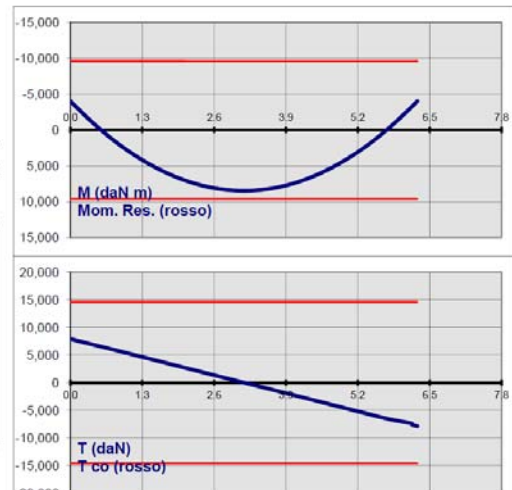
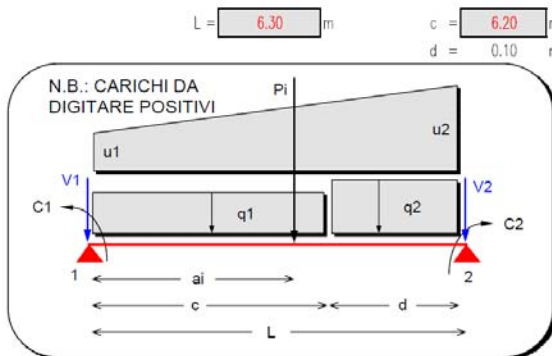


PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO

DIPARTIMENTO DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

TRAVE IMPALCATO

SCHEMA STATICO :

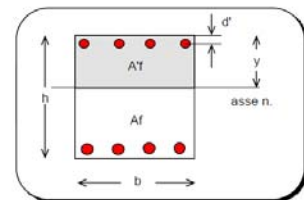


ANALISI DEI CARICHI :

CARICHI DISTRIBUITI :		q1	q2	CARICHI CONCENTRATI :		CARICO DISTRIBUITO TRAPEZIO :	
peso proprio :		760	760	P1 (daN) =	0	u1 =	0
carico 1 :	TETTO	0	0	P2 (daN) =	0	u2 =	0
carico 2 :	SOLAIO PERM.	750	750	P3 (daN) =	0	CARICHI CONCENTRATI SOPRA GLI APPOGGI : (*)	
carico 3 :	SOLAIO ACC.	1,000	1,000	P4 (daN) =	0	V1 =	0
carico 4 :	SBALZO	0	0	COPPIE DI ESTREMITA' :		V2 =	0
carico 5 :	MURI	0	0	C1 =	4,000	(*) effetti solo su valore reaz. vincolari	
totali		2,510	2,510	C2 =	4,000		

VERIFICA DELLE SEZIONI :

CARATTERISTICHE MATERIALI		REAZIONI VINCOLARI :	
Classe calcestruzzo (MPa):	$\sigma_{cls\ amm.} = 9.75$ MPa	R1 =	7,907 daN
R'bk = 30	$\tau_{co} = 0.60$ MPa	R2 =	7,907 daN
Fe = FeB 44 controllato	$\tau_{cs} = 1.83$ MPa		
	$\sigma_{Fe\ amm.} = 255$ MPa		



VERIFICA A FLESSIONE :

sezione	M daN m	Coeff. magg. M > 0	dimensioni sezione		copriferro d'	Area Fe teso Af	Area Fe compr. A' f	asse neutro y	tensioni (MPa)	
			h	b					$\sigma_{calc.}$	σ_{ferro}
S1: mom. < 0	4,000	-	31	100	4.0	15.70	15.70	8.3	3.12	106
S12: mom. max > 0	8,423	1.00	31	100	4.0	15.70	15.70	8.3	6.58	224
S2: mom. < 0	4,000	-	31	100	4.0	15.70	15.70	8.3	3.12	106

VERIFICA A TAGLIO :

	T co [daN] = 14,580		caratteristiche staffe					Area ferri piegati (Afp) cm²	tensioni (MPa)		
	T max daN	Lunghezze semitravi (m)	Diametro: Φ (mm)	numero bracci	numero min. di staffe (*)	passo medio (cm)	% scorrimento per staffe		τ_{co}	σ_{staffe}	σ_{fp}
Semitrave											
Semitr. 1-2	7,907	3.31	12	2	9	41.3	100	0.00	0.33		
Semitr. 2-1	7,907	2.99	12	2	9	37.4	100	0.00	0.33		

(*) TEORICO: infittire le staffe dove $T > T_{co}$; predisporre comunque un adeguato numero di staffe (vedi normative) anche con bassi valori del Taglio.

VERIFICA A DEFORMAZIONI ED AVVERTIMENTI :

Freccia massima (cm): f max = 0.96 f/L = 1/ 660	Mom. quadratico omogeneizzato: Jx = 1.06E+05 cm⁴	Messaggi di avvertimento sulle verifiche a taglio:
---	---	--

I progettisti

Ing. Stefano Minà

Ing. Maria Teresa Olmeo

Triuggio, Settembre 2014



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO
DIPARTIMENTO DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

ALLEGATI



ALLEGATO 1 – Descrizione del codice di calcolo HEC-RAS



DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO HEC-RAS

I calcoli idraulici sono stati svolti mediante l'utilizzo del codice HEC-RAS (v. 4.1 sviluppato da U.S. Army Corps of Engineers), per il calcolo dei profili delle correnti a pelo libero. Il suddetto programma di calcolo esegue le verifiche idrauliche elaborando i dati in input quali:

- geometria delle sezioni considerate;
- caratteristiche fisico-morfologiche del corso d'acqua (coefficiente di scabrezza di Manning e pendenza media del fondo alveo) nonché eventuali condizioni idrometriche al contorno;
- portata effluente.

Le quote idrometriche di output vengono visualizzate sulle sezioni trasversali e longitudinali, e compendiate in apposite tabelle recanti tutti i parametri idraulici (altezza critica, velocità, numero di Froude, etc.) che regolano il deflusso della portata considerata.

METODOLOGIA DI CALCOLO

Per le verifiche idrauliche si è utilizzata la teoria del moto permanente, che è caratterizzato da portate liquide costanti, mentre è consentita una variazione graduale della geometria lungo il tratto di corso d'acqua considerato.

Le equazioni che regolano il moto permanente sono l'equazione di continuità:

$$\partial(\rho Q)/\partial s = 0$$

che in caso di densità costante si riduce alla:

$$Q = \Omega \cdot U = \text{cost}$$

e l'equazione dinamica:

$$d/ds(z + p/\gamma + U^2/2g) = -j$$

dove:

Q = portata liquida

s = ascissa curvilinea

Ω = area di deflusso

U = velocità media

z = quota fondo alveo

p/γ = pressione idrostatica

j = perdita di carico distribuita



La cadente j del carico effettivo si valuta con le espressioni consigliate per il calcolo della perdita di carico nel moto uniforme, assumendo che gli sforzi tangenziali sul contorno dipendano solo dalle condizioni alla parete, dalla forma della sezione e dalla velocità media.

In caso di corsi d'acqua naturali, o comunque per canali di sezioni complesse, il problema del tracciamento della superficie libera in moto permanente con una determinata portata Q si risolve con procedimenti di calcolo numerico, con i quali vengono discretizzate ad intervalli più o meno piccoli le grandezze infinitesimali di cui sopra.

Il corso d'acqua deve essere suddiviso in tronchi Ds più o meno brevi, ma tali da poter confondere i valori medi della sezione e della velocità in ciascun tronco con i valori ad un estremo; occorre quindi un rilievo topografico dettagliato.

Successivamente si applica il metodo alle differenze finite nella variabile indipendente Ds e nella variabile dipendente DH (carico totale). Eventuali variazioni rapide di forma vanno valutate a parte in quanto le perdite devono tenere conto anche degli eventi vorticosi localizzati. Il procedimento di calcolo è inoltre valido solo nell'ambito di variazioni gradualì della corrente, nelle quali cioè il comportamento nei confronti della situazione di criticità è univocamente definito alla sezione iniziale e non può più cambiare, a meno di spezzettare il calcolo in tratti omogenei.

Come detto, per il calcolo del profilo di corrente in moto stazionario si è utilizzato il codice HEC-RAS, che utilizza un procedimento iterativo passo a passo basato sulla soluzione dell'equazione di bilancio energetico tra sezioni successive.

$$WS_2 + (\alpha_1 \cdot V_2^2)/2g = WS_1 + (\alpha_2 \cdot V_1^2)/2g + h_e$$

dove:

WS_1 = livello idrico sezione di valle;

WS_2 = livello idrico sezione di monte;

V_1 = velocità media sezione di valle;

V_2 = velocità media sezione di monte;

$\alpha_1 \alpha_2$ = coefficienti numerici di velocità;

g = accelerazione di gravità;

h_e = perdita di carico;

La perdita di carico tra due sezioni comprende una quota dovuta alla scabrezza del fondo ed una dovuta alla variazione della sezione trasversale di deflusso (contrazione/espansione), l'espressione che ne consente il calcolo risulta:



$$h_e = L I_f + C \cdot [(\alpha_2 \cdot V_2^2)/2g - (\alpha_1 \cdot V_1^2)/2g]$$

dove:

C = coefficiente di contrazione/espansione;

I_f = gradiente idraulico tra le sezioni;

$$I_f = (Q_1 + Q_2)/(K_1 + K_2);$$

Q_1, Q_2 portate;

K_1, K_2 conveyance totale;

L = media pesata della distanza tra le sezioni;

$$L = (L_{lob} \cdot QM_{lob} + L_{ch} \cdot QM_{ch} + L_{rob} \cdot QM_{rob}) / (QM_{lob} + QM_{ch} + QM_{rob})$$

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} distanza tra le due sezioni rispettivamente in golena sinistra, alveo e golena destra;

$QM_{lob}, QM_{ch}, QM_{rob}$ media aritmetica delle portate defluite nelle due sezioni in golena sinistra, alveo e golena destra.

Il coefficiente di velocità α viene calcolato, sulla base del valore di conveyance relativo a ciascuna delle componenti di portata in cui è suddivisa una sezione (golena sinistra, alveo, golena destra), mediante la seguente equazione:

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

dove:

A_t : area di deflusso totale della sezione;

A_{lob}, A_{ch}, A_{rob} : area di deflusso in golena sinistra, alveo e golena destra;

K_t : conveyance totale della sezione;

K_{lob}, K_{ch}, K_{rob} : componente di conveyance in golena sinistra, alveo e golena destra.

Perdite di carico dovute a contrazione/espansione della corrente

Le perdite di carico dovute alle variazioni di velocità della corrente, conseguenti a restringimenti o allargamenti delle sezioni trasversali lungo l'asta, vengono valutate secondo la formula:

$$h_0 = C \cdot [(\alpha_2 \cdot V_2^2)/2g - (\alpha_1 \cdot V_1^2)/2g]$$

dove:

C = coefficiente di contrazione/espansione



Hec-Ras assume come C il coefficiente di contrazione quando il carico cinetico della sezione di valle è superiore a quello della sezione di monte, il coefficiente di espansione in caso opposto. Il coefficiente C, che rappresenta la quota di carico cinetico dissipata nel passaggio della corrente tra due sezioni, assume i seguenti valori:

	Contrazione	Espansione
Nessuna variazione di sezione	0.0	0.0
Variazioni graduali	0.1	0.3
Restringimento dovuto ad un ponte	0.3	0.5
Brusche variazioni di sezione	0.6	0.8

Procedura di calcolo

Per il calcolo del profilo di piena in moto stazionario il codice Hec-Ras utilizza un procedimento di tipo iterativo che, nel caso di due generiche sezioni, può essere riassunto secondo i seguenti passi:

1. assunzione di un valore di altezza d'acqua nella sezione a monte o in quella a valle, a seconda che si tratti di un profilo di corrente lenta o veloce;
2. calcolo dei corrispondenti valori di carico cinematico e conveyance totale;
3. determinazione del gradiente idraulico I_f e delle perdite di carico totali che tra le due sezioni;
4. risoluzione dell'equazione di bilancio energetico, calcolo del valore WS_2 ;
5. confronto del valore WS_2 calcolato con quello assunto al primo passo; ripetizione della sequenza di operazioni sino a quando l'errore rientra nel limite di tolleranza definito (0.003 m).

Il criterio utilizzato per l'assunzione di un valore di altezza d'acqua di tentativo varia nelle successive iterazioni. Nella prima iterazione viene assunto il valore definito per la sezione precedente, nella seconda il valore calcolato, corretto in funzione dell'errore riscontrato:

$$WS_{\text{nuovo}} = WS_{\text{assunto}} + 0.70 \cdot (WS_{\text{calcolato}} - WS_{\text{assunto}})$$

Nelle successive iterazioni viene applicato il metodo della secante:

$$WS_I = WS_{I-2} - \text{Err}_{I-2} \cdot \text{Err}_{\text{ass}} / \text{Err}_{\text{diff}}$$

dove:

WS_I nuovo valore del livello idrico;

WS_{I-1} valore di livello idrico assunto nell'iterazione precedente;

WS_{I-2} valore di livello idrico assunto nella penultima iterazione;



Err_{1-2} differenza tra il livello idrico calcolato e quello assunto nell'iterazione 1-2;

Err_{ass} differenza tra i livelli idrici assunti nelle due iterazioni precedenti = $WSI-2 - WSI-1$;

Err_{diff} differenza tra il livello idrico assunto e quello calcolato nell'iterazione precedente, più l'errore definito nella penultima iterazione = $WS_{I-1} - WS_{Calcl-1} + Err_{1-2}$

Equazione di conservazione della quantità di moto

L'equazione di bilancio energetico vale soltanto quando si hanno variazioni graduali di corrente, in particolare, quando il profilo idraulico presenta una sezione caratterizzata da una profondità di corrente pari all'altezza critica, l'equazione di bilancio energetico non è più applicabile. La presenza di una sezione con altezza critica d'acqua evidenzia una variazione rapida del moto, con passaggio da corrente lenta a veloce viceversa. Ciò può verificarsi in numerose situazioni: a seguito di un cambiamento della pendenza di fondo alveo, per la presenza di un restringimento in corrispondenza di un ponte, a causa della presenza di salti di fondo, o in corrispondenza di una confluenza tra due corsi d'acqua.

L'equazione di conservazione della quantità di moto ha la seguente espressione generale:

$$P_1 - P_2 + W_x - F_f = Q \cdot \rho \cdot \Delta V_x$$

dove:

P = forze dovute alla pressione idrostatica nelle sezioni 1 e 2;

W_x = forza peso nella direzione x

F_f = forza di attrito tra le sezioni 1 e 2;

Q = portata;

ρ = densità dell'acqua;

ΔV_x = variazione di velocità tra le sezioni 1 e 2, nella direzione x

essendo:

$$P = g \cdot A \cdot \hat{Y} \cos \theta$$

g = peso specifico dell'acqua;

A = area di deflusso;

\hat{Y} = profondità della corrente.

$$W_x = g \cdot [(A_1 + A_2)/2 \cdot L \cdot \sin \theta]$$

L = distanza tra le due sezioni successive;

z_i = quota fondo della sezione i -esima

$$\sin \theta = (z_1 - z_2)/L$$



PARCO REGIONALE DELLA VALLE DEL LAMBRO
DIPARTIMENTO DI RIQUALIFICAZIONE FLUVIALE

$$F_f = t \cdot P_m \cdot L$$

$t = g \cdot R \cdot S_f$ tensione superficiale d'attrito;

P_m = sviluppo medio del contorno bagnato nelle sezioni 1 e 2;

R = raggio idraulico;

S_f = gradiente idraulico