



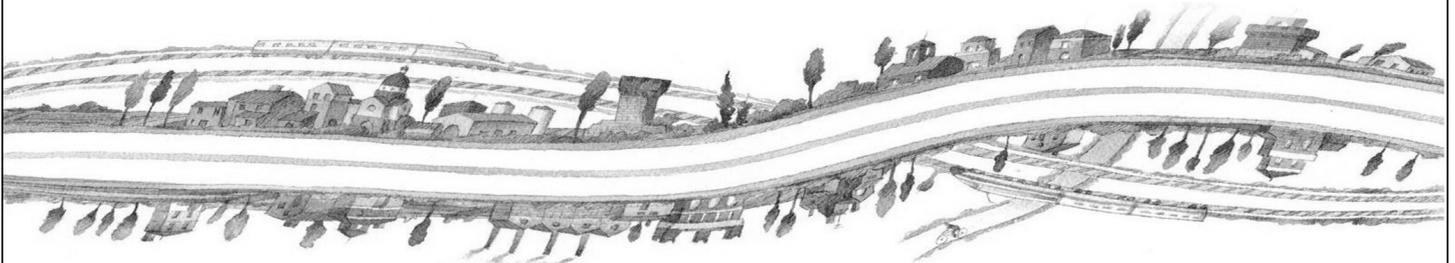
AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA DAL CASELLO DI REGGIOLO-ROLO SULLA A22 AL CASELLO DI FERRARA SUD SULLA A13

CODICE C.U.P. E81B08000060009

PROGETTO DEFINITIVO

ASSE AUTOSTRADALE

IDROLOGIA E IDRAULICA
IDRAULICA CORSI D'ACQUA PRINCIPALI
CANALE DI CENTO
RELAZIONE IDRAULICA



IL PROGETTISTA

RESPONSABILE INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

IL CONCESSIONARIO

NOME COGNOME E PROGETTISTA
NIBS GR. ALBO EN 11099

Ing. Emilio Salsi
Albo Ing. Reggio Emilia n° 945

Autostrada Regionale
Cispadana S.p.A.
IL PRESIDENTE
Graziano Pattuzzi



Graziano Pattuzzi

| | | | | | |
|------|------------|-------------|-----------|-----------|--------------|
| G | | | | | |
| F | | | | | |
| E | | | | | |
| D | | | | | |
| C | | | | | |
| B | | | | | |
| A | 17.04.2012 | EMISSIONE | ZANZUCCHI | TELO' | SALSI |
| REV. | DATA | DESCRIZIONE | REDAZIONE | CONTROLLO | APPROVAZIONE |

IDENTIFICAZIONE ELABORATO

| | | | | | | | | | |
|-------------|------|-------|--------|------------------|--------------|--------|----------------|-------------|------|
| NUM. Progr. | FASE | LOTTO | GRUPPO | CODICE OPERA WBS | TRATTO OPERA | AMBITO | TIPO ELABORATO | PROGRESSIVO | REV. |
| 0707 | PD | 0 | A40 | AWS16 | 0 | WW | RI | 01 | A |

DATA: **MAGGIO 2012**

SCALA:

INDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. PREMESSA..... | 2 |
| 2. INQUADRAMENTO NORMATIVO..... | 3 |
| 2.1. NORMATIVA | 3 |
| 2.2. CRITERI E RACCOMANDAZIONE DEL CONSORZIO DI BONIFICA DELLA PIANURA DI FERRARA..... | 3 |
| 3. CRITERI GENERALI | 6 |
| 3.1. ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO | 6 |
| 3.2. IL MODELLO MATEMATICO PER LA PROPAGAZIONE DELL'ONDA DI PIENA | 8 |
| 4. AMBITO DI RIFERIMENTO | 12 |
| 4.1. IL COMPENSORIO DI BONIFICA | 12 |
| 4.2. TRACCIATO AUTOSTRADALE INTERFERENTE CON IL CORSO D'ACQUA | 13 |
| 5. INQUADRAMENTO TERRITORIALE | 14 |
| 5.1. CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE | 14 |
| 5.2. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E MORFOLOGICHE DELL'ALVEO (TENDENZA MORFO-EVOLUTIVA DEL CORSO D'ACQUA)..... | 21 |
| 6. DEFINIZIONE DELLE PORTATE DI RIFERIMENTO | 23 |
| 7. VERIFICHE IDRAULICHE..... | 24 |
| 7.1. ATTRAVERSAMENTO ED OPERE IDRAULICHE CONNESSE..... | 24 |
| 7.1.1. Ponte sul Canale di Cento I..... | 24 |
| 7.1.2. Ponte sul Canale di Cento II..... | 24 |
| 7.2. VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA STATO DI FATTO - STATO DI PROGETTO..... | 25 |
| 7.2.1. Condizioni di riferimento | 25 |
| 7.2.2. Risultati delle analisi idrauliche e verifica del franco di sicurezza dell'attraversamento..... | 26 |
| 7.2.3. Valutazione della compatibilità idraulica attraversamento Cento I..... | 37 |
| 7.2.4. Valutazione della compatibilità idraulica attraversamento Cento II..... | 39 |
| 7.3. Verifica di compatibilità idraulica in presenza di opere provvisionali..... | 40 |
| 8. INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA | 41 |

1. PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del Progetto Definitivo della Viabilità di adduzione al sistema autostradale - D04-D08 (ex 1FE) Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada Cispadana facente parte della progettazione delle opere complementari all'Autostrada Regionale Cispadana. Il lavoro si propone di definire le grandezze idrauliche di riferimento e, di conseguenza, di stabilire gli interventi e gli accorgimenti da adottare, al fine di garantire la compatibilità tra le infrastrutture stradali di attraversamento del Canale di Cento, corso d'acqua di bonifica interferito direttamente dall'opera in progetto.

Il canale viene attraversato due volte dal Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada Cispadana entrambi nel tratto C: il primo attraversamento avviene in adiacenza a quello autostradale a sud dell'abitato di Casumaro dove il canale corre parallelo alla SP di Pilastrello poco prima che il canale la sottopassi per piegare verso est; il secondo attraversamento avviene ad est del Ponte Trevisani in vicinanza di quest'ultimo. Il Canale di Cento viene anche attraversato dall'Autostrada Cispadana a sud del ponte Cento I.

La presente relazione tratta gli attraversamenti I e II del Raccordo Bondeno-Cento tuttavia la modellistica idraulica, come si vedrà dai grafici, è stata sviluppata in modo estensivo su tutto il tratto analizzato e comprende pertanto anche l'attraversamento autostradale.

Il percorso progettuale seguito è stato coordinato e condiviso con l' Ente Gestore del corso d'acqua, Consorzio di bonifica Pianura di Ferrara, e tiene conto delle prescrizioni impartite durante la Conferenza dei Servizi sul Progetto Preliminare che si è conclusa con l'approvazione dello stesso nel Dicembre 2011.

Il risultato finale consiste nell'aver rispettato:

- ogni singola sezione di deflusso di attraversamento per il transito delle piene di riferimento di progetto stabilite in relazione a quanto previsto dalla normativa vigente nonché impartito direttamente dal Consorzio gestore (trattandosi di corsi d'acqua regolati la portata di riferimento è stabilita dall'Ente gestore in funzione del regime idraulico del canale);
- i franchi imposti tra livelli idrometrici per la piena di progetto e le quote arginali e/o spondali;
- distanze minime dai cigli arginali e/o spondali;
- le opere idrauliche di protezione sotto ogni attraversamento stradale e nelle immediate vicinanze dello stesso, inteso come: difese spondali e di fondo, ringrossi arginali, protezione dei paramenti arginali sia in frodo che lato campagna;
- la continuità e la conservazione della viabilità gestionale sia in caso di piena che di magra.

2. INQUADRAMENTO NORMATIVO

2.1. NORMATIVA

Lo sviluppo degli studi, analisi e verifiche idrauliche nonché la successiva progettazione delle opere di risoluzione delle interferenze è stata sviluppata nel rispetto delle Normative Nazionali e Regionali in materia nonché delle Norme Tecniche di Attuazione e Direttive Tecniche del PAI dell'Autorità di bacino del Fiume Po e del PSAI dell'Autorità di bacino del Fiume Reno.

Per la consultazione delle specifiche norme si rimanda all'elaborato:

0036PD0000000000GEKT01A - ELENCO DELLE NORMATIVE DI RIFERIMENTO

2.2. CRITERI E RACCOMANDAZIONE DEL CONSORZIO DI BONIFICA DELLA PIANURA DI FERRARA

La progettazione definitiva delle opere necessarie al superamento delle interferenze con i canali di bonifica è stata fondata oltretutto sulle risultanze del progetto preliminare sulle indicazioni e prescrizioni impartite dal Consorzio della Bonifica di Ferrara con il parere prot. 10429 del 16/05/2011 espresso per la Conferenza dei Servizi (CdS). Le prescrizioni avevano carattere generale e riportavano richieste suddivise per attraversamenti risolti con ponti a luce libera e per quelli risolti mediante inserimento di manufatti tombinati; durante l'attuale fase progettuale sono stati esaminati, con i tecnici del Consorzio, tutti gli attraversamenti in progetto e sono state adottate scelte condivise per la risoluzione di ciascuno di essi.

Per quanto riguarda i ponti a luce libera i criteri e le raccomandazioni prevedono:

- *verifiche idrauliche da sviluppare per lo stato di fatto e di progetto adottando come portata di riferimento la portata a piene rive (portata massima sostenibile);*
- *nei punti d'intersezione in cui si realizzeranno ponti a luce libera si dovranno strutturare i manufatti in modo da evitare il posizionamento di pile di appoggio all'interno dell'alveo del canale e mantenere un franco minimo di ml. 1,00 tra il sottotrave e il piano campagna o la sommità arginale del punto intersecato;*
- *nei ponti a luce libera dovranno inoltre essere previsti, sia in destra che in sinistra idraulica, appositi sottopassi all'arteria stradale, realizzati lungo la canalizzazione demaniale o nelle immediate vicinanze,*

con una larghezza minima di ml. 4,00 ed un'altezza utile minima di ml. 5,00, posizionati a quota tale da evitare ristagni di acque meteoriche sul piano di transito;

- *se i sottopassi di cui al punto precedente saranno posizionati non in linea con il canale ma nelle immediate vicinanze, dovranno essere previste apposite strade di raccordo tra gli stessi e la canalizzazione dotate, se necessario, delle rampe di salita e discesa dagli argini. Tali strade di raccordo dovranno essere appositamente strutturate tramite massetto in stabilizzato di adeguato spessore in modo da essere percorribili, anche in condizioni di avversità climatiche, con i mezzi abitualmente impiegati per la manutenzione e la gestione della canalizzazione;*
- *eventuali modifiche del tracciato dell'alveo dovranno prevedere, a cura e spese del titolare dell'opera viaria, l'acquisizione al demanio dello Stato per opere di bonifica delle superfici necessarie al nuovo tracciato, compreso di frazionamenti ed atti notarili. Inoltre i nuovi tratti dovranno essere realizzati con pendenza e sezioni tali da garantire almeno le attuali portate, sia irrigue che di scolo, dei canali. Le sezioni e i profili proposti per i nuovi tracciati all'atto della richiesta di autorizzazione dovranno essere corredati da apposite relazioni idrauliche.*
- *in presenza di ponti a luce libera si dovrà procedere al rivestimento di scarpate e fondo sia nel tratto sottostante l'impalcato che per ulteriori 10 ml. a monte ed a valle dello stesso;*
- *la progettazione dell'opera dovrà prevedere anche tutti gli interventi necessari per garantire il mantenimento della funzionalità dei corsi d'acqua, di scolo ed irrigui, di competenza privata intersecati dalla nuova autostrada e dalla viabilità di raccordo;*
- *tutti gli interventi che si andranno ad attuare sulla canalizzazione dovranno prevedere la realizzazione delle opere provvisorie necessarie ad assicurare la continuità del flusso idraulico durante tutto il periodo di cantiere.*

In fase di progettazione definitiva sono stati svolti vari incontri con i tecnici del Consorzio di Ferrara finalizzati ad approfondire i criteri generali esposti nel parere di CdS nonché ad esaminare nel dettaglio i singoli attraversamenti e per ciascuno di essi definire le prescrizioni specifiche. Durante tali incontri sono stati concordati ulteriori prescrizioni generali:

- *i sottopassi funzionali al passaggio dei mezzi consorziali potranno essere ridotti ad una altezza minima di 4.0m solo per quei canali specificamente discussi con il CB; la larghezza dovrà essere comunque di 4m (netti);*
- *se il passaggio dei mezzi consorziali avviene sulla sponda e sotto l'impalcato del ponte dovrà essere garantita una larghezza minima tra ciglio sponda e spalla del ponte di almeno 5-7m;*

- se non è previsto il passaggio dei mezzi sotto il ponte dovrà comunque essere garantita una distanza minima tra ciglio sponda e spalla ponte di almeno 2-3m; tale superficie dovrà essere rivestita in massi intasati di cemento analogamente alla sezione sotto l'ombra del ponte;
- in alcuni casi il rivestimento spondale a monte e valle dei tombini potrà essere ridotto a 5m anziché i 10 prescritti in relazione all'importanza del canale e comunque da definirsi puntualmente.

Nell'analisi specifica del Canale di Cento è stato richiesto e sono stati concordati con il Consorzio i seguenti interventi:

1. realizzazione di nuovo attraversamento con ponte in luce rispettando il franco di 1.5m sulla piena di progetto definita in base alla portata massima sostenibile; per il Cento I il franco concordato è inferiore e fissato in 0.70m in quanto l'altimetria delle strade circostanti che devono essere raccordate con la Bondeno-Cento non consente di raggiungere maggiori quote dell'intradosso del ponte
2. continuità del passaggio dei mezzi consorziali ottenuta realizzando piste di raccordo tra le capezzagne esistenti in destra e sinistra del canale con il Raccordo Bondeno-Cento che potrà essere percorso e superato dai mezzi d'opera;
3. realizzazione di opere di protezione del fondo e spondale continue nel tratto compreso tra l'attraversamento del Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada e quello dell'Autostrada Cispadana al fine di ridurre gli interventi di manutenzione nel tratto intercluso; il rivestimento dovrà inoltre estendersi anche a valle del ponte in progetto.

Come si evince dalle risultanze dello studio e dalle descrizioni seguenti dell'intervento in progetto risultano rispettate i criteri e prescrizioni impartite.

3. CRITERI GENERALI

3.1. ARTICOLAZIONE DELLO STUDIO

Lo studio idrologico-idraulico, nel suo complesso, si è articolato nelle seguenti fasi.

Fase 1^a: Definizione di un quadro conoscitivo di riferimento morfologico e idraulico

Scopo di questa fase è la predisposizione di uno strumento conoscitivo in grado di valutare le sollecitazioni idrauliche del corso d'acqua nel tratto di interesse, intese quali idrogrammi di piena (livelli e portate), ricavate attraverso analisi idrologiche e processi di modellazione matematica, e le condizioni idrauliche al contorno, sia a monte che a valle, per quanto non espresso dagli eventuali dati idrometrici disponibili.

Per la definizione completa della geometria del Canale di Cento nel tratto in studio è stato realizzato uno specifico rilievo topografico nell'estate del 2011 nell'ambito del quale è stata rilevata la geometria del canale descritta attraverso 36 sezioni trasversali per una lunghezza di circa 7,8 km.

Fase 2^a: Analisi idrologia e idraulica del corso d'acqua

Per il canale è stata condotta una precisa analisi idrologica ed idraulica, in grado di approfondire, attraverso un processo di modellazione matematica comparativa tra lo stato di progetto e lo stato di fatto, le perturbazioni dell'attraversamento viario sulle dinamiche idrauliche.

Il Canale di Cento è un corso d'acqua artificiale con funzione promiscua di scolo ed irrigazione e sottende un comprensorio territoriale non univocamente definito in quanto variabile in funzione dell'uso considerato ed in funzione della regolazione meccanica delle portate sia in condizioni irrigue sia in condizioni di sofferenza allo scolo. La particolare caratteristica dei corsi d'acqua di bonifica risiede proprio nella loro funzionalità e negli usi a cui sono preposti; l'ambivalenza delle funzioni di scolo ed irrigazione rende non poco difficile l'analisi idrologica in quanto a rigori essi vanno studiati sotto il profilo della funzione di drenaggio delle acque meteoriche tuttavia utilizzati, soprattutto nelle stagioni primaverili ed estive anche per irrigazione mantenendo alti i livelli in alveo e riducendo la capacità di assorbimento di eventi pluviometrici importanti. All'interno delle difficoltà oggettive e tipiche di un comprensorio di bonifica sono stati sviluppati studi funzionali alla caratterizzazione dei deflussi dei canali principali per i quali è stata predisposta una modellazione matematica dei deflussi volta ad individuare i livelli idrometrici da assumere a riferimento per la progettazione dei manufatti di attraversamento.

Lo studio è stato condotto adottando parametri progettuali e di verifica cautelativi, sono infatti state estese, le

prescrizioni tecniche stabilite dall'Autorità di bacino per il Po nell'ambito del PAI anche sui canali principali per i quali il tempo di ritorno di riferimento è $TR=100$ anni.

Tra i parametri progettuali si è scelta, come condizione più critica la funzione di scolo; le portate massime assunte a riferimento ed adottate come portate di progetto sono le portate massime sostenibili dalla sezione media del canale nel tratto studiato. Tale assunzione, già adottata ed approvata dal Consorzio di bonifica della Pianura di Ferrara nell'ambito del proprio parere alla Conferenza di Servizio sul Progetto Preliminare, è stata ribadita nel presente Progetto Definitivo dove tuttavia si è estesa la valutazione all'intero tratto di canale rilevato e modellato idraulicamente.

Si conferma che la massima portata sostenibile, portata a piene rive, si colloca nella curva di durata delle portate dei canali di bonifica, nel range di tempi di ritorno compreso tra i 20 ed i 100 anni. Ciò si dimostra in linea con i tempi di ritorno caratteristici della progettazione di bonifica, generalmente associabili a $TR=20-30$ anni. I manufatti di attraversamento sono stati sempre impostati con tirante d'aria, rispetto al piano campagna di almeno 100 cm per evitare funzionamenti in pressione; per il Cento I è stata concordata con il Consorzio una deroga a tale limite riducendo il franco ad una altezza di 0.70m.

L'analisi idrografica ha preso in esame, per i canali principali, i parametri caratteristici dei corsi d'acqua interferiti intesi come superficie afferente, rispetto alla sezione di chiusura fissata in corrispondenza dell'attraversamento autostradale, lunghezza dell'asta, quote e pendenze, coefficiente di deflusso.

L'analisi idrologica è stata sviluppata adottando coefficienti idrometrici di riferimento che hanno consentito il tracciamento di curve di durata caratteristiche dalle quali, nota la superficie afferente al canale sono state ricavate le portate che sollecitano l'alveo per gli assegnati tempi di ritorno; la portata di riferimento è stata fissata nella massima portata sostenibile dalla sezione attuale e si è posta a confronto anche la portata monosecolare.

L'analisi idraulica è stata condotta mediante modellazione matematica in moto permanente, si sono indagate e confrontate la condizione attuale, stato di fatto e quella futura, stato di progetto.

Fase 3^a: Progettazione delle opere di presidio idraulico

Sulla base delle risultanze delle analisi idrauliche si è, quindi, proceduto alla definizione delle opere di presidio idraulico necessarie a garantire sia l'ufficiosa idraulica delle strutture in progetto, che la compatibilità delle stesse con le dinamiche del corso d'acqua. Sono stati, inoltre, definiti gli accorgimenti e gli interventi necessari al corretto superamento dell'alveo inciso nonché delle arginature dove presenti.

Per il progetto delle difese attive sono state privilegiate soluzioni di ingegneria naturalistica a basso impatto ambientale, condivise con il Consorzio di bonifica. Nella scelta e tipologia dei rivestimenti protettivi in massi si è rispettato quanto prescritto dal Consorzio di bonifica nel parere di CdS; analogamente si sono rispettate

le distanze minime richieste per l'estensione dei rivestimenti, per il posizionamento delle spalle e per la ricucitura delle piste di servizio e manutenzione.

Tutte le soluzioni adottate sono state discusse e concordate con il Consorzio di bonifica Pianura di Ferrara con il quale il confronto diretto ha consentito di approfondire le problematiche dell'intervento nonché rispettare le prescrizioni di carattere generale e specifiche che sono state fornite durante la fase progettuale definitiva in apposite riunioni come risulta dai verbali relativi.

3.2. IL MODELLO MATEMATICO PER LA PROPAGAZIONE DELL'ONDA DI PIENA

Per il Canale di Cento è stata condotta un'analisi idraulica mediante modellazione numerica monodimensionale. La ricostruzione in formato digitale delle morfologie dell'alveo e delle aree limitrofe si è basata sui dati geometrici rilevati direttamente per la esecuzione dell'infrastruttura in progetto.

Il confronto tra le dinamiche idrauliche nello stato di fatto ed in quello di progetto, che prevede la realizzazione del tracciato autostradale e delle relative opere accessorie, ha consentito di evidenziare sia il funzionamento attuale del corso d'acqua, considerando anche le interferenze prodotte dagli attraversamenti esistenti, sia l'influenza apportata dall'infrastruttura in progetto. Tali influenze si riconducono soprattutto ad alterazioni dei profili di rigurgito e di velocità della corrente dove si sono osservate significative alterazioni nello stato di fatto per la presenza di numerosi tombini e ponticelli di sezione ridotta rispetto a quella del canale mentre non si rilevano alterazioni per l'attraversamento di progetto. Dall'analisi modellistica nello stato di fatto si sono ricavati i vincoli geometrici che l'opera di attraversamento deve rispettare, in termini di quota dell'intradosso ed eventualmente di numero e posizione di pile e spalle del ponte.

Il modello adottato per le simulazioni matematiche effettuate, integra numericamente le equazioni differenziali del moto vario per correnti monodimensionali gradualmente variate. L'ipotesi di monodimensionalità è ampiamente giustificata nella grande maggioranza dei tratti dei corsi analoghi a quelli in esame; essa risulta poco corretta solo in corrispondenza di brusche variazioni nella geometria della sezione liquida trasversale, ma in tali circostanze il raffittimento del rilievo geometrico limita le possibili fonti di imprecisione.

Il modello utilizzato, è *HEC-RAS River Analysis System*, elaborato dall'*Hydrologic Engineering Center dell'US Army Corps of Engineers degli U.S.A.* (versione 4.1.0, gennaio 2010).

Si tratta di uno strumento d'applicabilità molto ampia, largamente utilizzato presso Enti Pubblici e Privati negli Stati Uniti e in oltre 40 nazioni, ed ormai adottato anche da molti Enti Pubblici Italiani.

Il modello è stato progettato per contenere vari moduli di analisi idraulica monodimensionale: analisi di moto

permanente, analisi del moto vario, analisi del trasporto solido in letto mobile. Tra le diverse componenti quella utilizzata nel presente studio consiste nell'algoritmo di calcolo idraulico per la determinazione delle variazioni della portata, della velocità, della larghezza del pelo libero della corrente e di altre caratteristiche idrauliche del moto durante la propagazione verso valle della corrente idrica di portata nota, per effetto della capacità di laminazione naturale dell'alveo, della sua resistenza d'attrito, della presenza di opere interagenti con la corrente (ponti e traverse).

Il modello, calcola i profili di moto vario per corsi d'acqua monodimensionali in regime di corrente lenta, veloce o mista. Il programma, è in grado di calcolare e gestire i profili per una rete di canali naturali o artificiali in un sistema ad albero od a singolo ramo. Le relazioni fondamentali della formulazione matematica sono le equazioni dei moti permanenti nell'espressione classica dell'equazione monodimensionale dell'energia secondo Manning. Le perdite valutate sono quelle d'attrito (secondo Manning), valutate per le diverse parti della sezione trasversale (canale centrale, sponde laterali, golene e parti di golene), e quelle causate dalla contrazione o espansione delle sezioni (tramite un coefficiente che moltiplica la variazione dell'altezza cinetica). L'equazione della quantità di moto è utilizzata nei punti dove il profilo del pelo libero subisce brusche variazioni ovvero in regime misto nel passaggio da corrente veloce a corrente lenta oppure, in corrispondenza di ponti, traverse e sottopassi o alla confluenza di più rami di una rete.

Il modello richiede, oltre alla geometria generale del corso d'acqua, profili e sezioni trasversali, i dati di portata in ingresso nella prima sezione di monte ed, eventualmente in tutte le sezioni dove sono disponibili dati di portata, ed infine le condizioni al contorno dipendenti dal regime di moto della corrente.

L'equazione generale dell'energia è la seguente:

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

dove:

- Y_1, Y_2 altezza idrometrica nella sezione 1 e 2,
- Z_1, Z_2 quota del fondo alveo nelle sezioni 1 e 2,
- V_1, V_2 velocità medie (portata totale/area bagnata) nelle sezioni 1 e 2,
- α_1, α_2 coefficienti di velocità,
- h_e perdita di carico nel tratto 1-2.

La perdita di carico tra due sezioni trasversali è calcolata come somma delle perdite distribuite per attrito e di quelle concentrate per effetto di contrazioni o allargamenti bruschi di sezione secondo l'equazione:

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

dove:

- L distanza pesata, in funzione della portata, tra le due sezioni trasversali 1 e 2,
- S_f pendenza motrice tra le sezioni 1 e 2,
- C coefficiente di perdita di carico per contrazione o allargamento di sezione.

La pendenza d'attrito S_f è valutata secondo l'espressione di Manning:

$$S_f = n^2 Q|Q| / (A^2 R^{4/3})$$

dove n è il coefficiente di resistenza di Manning (che vale anche $n=1/c$ con c di Gauckler-Strickler) ed R è il raggio idraulico.

L'equazione differenziale del moto viene integrata per via numerica, attraverso un insieme di fasi iterative che vengono ripetute più volte per affinarne la risoluzione; per la determinazione dei profili è quindi necessario fornire le condizioni iniziali di portata in ingresso e le condizioni al contorno in funzione del regime di moto.

La procedura di calcolo per la determinazione del profilo idraulico per portata assegnata, richiede i seguenti dati:

- descrizione completa del tronco fluviale, costituita dalla rappresentazione geometrica delle sezioni di rilievo trasversali e relativo loro posizionamento plano-altimetrico;
- descrizione geometrica di opere trasversali (ponti e relativi rilevati di accesso, tombini scatorari, traverse fluviali, soglie di fondo, briglie etc.) e/o longitudinali in alveo;
- caratterizzazione della resistenza al moto in alveo e golene mediante la definizione del coefficiente di scabrezza di Manning;
- definizione dei coefficienti di contrazione/espansione, per effetto di perturbazioni offerte al moto da parte di opere trasversali presenti in alveo;
- definizione del tipo di moto (corrente lenta o veloce) nel tronco fluviale;
- condizione al contorno di partenza del calcolo del profilo secondo tre possibili metodologie:
- introduzione di una altezza d'acqua nota di valle o di monte, a seconda che il moto avvenga in corrente lenta o veloce,
- calcolo eseguito a partire dall'altezza critica,
- calcolo eseguito a partire dalla pendenza di fondo alveo.



AUTOSTRADA
REGIONALE
CISPADANA

REGIONE EMILIA ROMAGNA

AUTOSTRADA REGIONALE CISPADANA
dal casello di Reggiolo-Rolo sulla A22 al casello di Ferrara Sud sulla A13

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTO DELLE VIABILITA' DI ADDUZIONE AL SISTEMA AUTOSTRADALE

D04-D08 (ex 1FE) – Raccordo Bondeno-Cento-Autostrada Cispadana

IDRAULICA CORSI D'ACQUA PRINCIPALI – CANALE DI CENTO I e II

RELAZIONE IDRAULICA

Il calcolo del rigurgito prodotto dalle pile del ponte viene eseguito secondo diversi metodi :

- Equazione di Yarnell;
- Metodo di conservazione della quantità di moto.

4. AMBITO DI RIFERIMENTO

4.1. IL COMPENSORIO DI BONIFICA

Il comprensorio della bonifica del Consorzio della Pianura di Ferrara comprende un vasto territorio che precedentemente apparteneva a vari consorzi della bassa pianura nel tratto delimitato dal fiume Panaro fino al mar Adriatico; nello specifico il territorio tra Panaro e Ferrara apparteneva al Consorzio Valli di Vecchio Reno. Il comprensorio di interesse è caratterizzato da una morfologia piatta sulla quale le fluttuazioni antiche del Reno hanno originato i paleoalvei e da essi i dossi di pianura disposti in una complessa rete e che si trovano in condizioni altimetriche di rilevato relativo e che sono solitamente caratterizzati da terreni più grossolani rispetto alla matrice alluvionale delle zone un tempo vallive e dei bacini di colmata che popolano la pianura.

L'altimetria del comprensorio degrada dai 22 metri sul livello del mare all'estremo sud-ovest, fino a meno di 4 metri sul livello del mare in corrispondenza della depressioni più marcate. Le condizioni altimetriche e morfologiche del comprensorio consentono, ad eccezione di alcune depressioni, lo scolo naturale delle acque. L'idrografia è caratterizzata da una marcata complessità, dovuta essenzialmente alla diversità dei recapiti esterni e all'origine ovunque antica del reticolo dei canali. I terreni del comprensorio hanno un'origine alluvionale, caratterizzata da un'intima mescolanza di apporti dal sistema padano-alpino con quelli prevalenti di origine appenninica. In esso assumono un'importanza fondamentale i terreni sabbioso limosi, che si ritrovano in corrispondenza dei dossi di pianura mentre nelle aree intervallive la matrice dominante è quella di suoli limosi ed argillosi caratteristici dei depositi alluvionali. Il territorio del comprensorio presenta una dominanza di seminativi pari a circa il 65% del totale della superficie, seguono le superfici urbanizzate 20%, le superfici destinate ad colture arboree e boscate 15%. Il territorio è soggetto al clima continentale moderatamente temperato della pianura padana ed è scarsamente influenzato dalla vicina presenza del mare Adriatico. Le precipitazioni sono numericamente scarse ma distribuite uniformemente nelle quattro stagioni, con valori più alti in autunno, primavera e estate e più bassi in inverno; la piovosità media annua è dell'ordine dei 700-600 mm.

Il comprensorio di bacino ricade nella Provincia di Ferrara ed appartiene al bacino idrografico del fiume Po.

4.2. TRACCIATO AUTOSTRADALE INTERFERENTE CON IL CORSO D'ACQUA

Il tracciato del Raccordo Bondeno-Cento interseca il Canale di Cento nel tratto C: una prima volta alla progressiva chilometrica 3+085 in affiancamento all'autostrada Cispadana dove il canale corre parallelo alla SP di Pilastrello ed una seconda volta alla progressiva chilometrica 7+067 in località Ponte Trevisani dove il canale corre parallelo alla SP di Correggio.

L'attraversamento Cento I avviene poco prima che il Canale di Cento attraversi la SP di Pilastrello per piegare bruscamente verso est e seguire la strada Frutteti; in corrispondenza del nuovo ponte il raccordo si mantiene in rilevato basso sulla campagna in quanto deve connettersi alla SP di Pilastrello che a sua volta dovrà sottopassare l'Autostrada Cispadana poco più a sud del Raccordo. Tale concomitanza di intersezioni richiede una risoluzione dell'interferenza con soluzione bassa tale da mantenere il più possibile ridotta l'altezza dei rilevati di approccio ai ponti sia per il raccordo sia per l'Autostrada. Il ponte Cento I è a luce unica quasi ortogonale all'asse di deflusso con cui forma un angolo di 87°.

L'attraversamento Cento II avviene in località Trevisani circa 40m a valle dell'esistente ponte che raccorda la SP in sinistra idraulica con le viabilità interpoderali in destra idraulica. Il tracciato del raccordo è in curva di ampio raggio, in corrispondenza del nuovo ponte, e l'asse stradale è disposto lungo la direttrice nord-sud. Il tracciato è in rilevato sulla campagna con quota altimetrica minima per raggiungere il franco idraulico richiesto per il passaggio sopra il canale di Cento.

Il ponte Cento II è a luce unica ed inclinato rispetto all'asse di deflusso con cui forma un angolo di 115°.

Entrambe le interferenze avvengono in vicinanza dell'abitato di Casumaro, la prima circa 2300m a sud e la seconda circa 2100m ad est.

Il Raccordo presenta piste di servizio ad ovest ed est che sono raccordate alle capezzagne esistenti in sinistra e destra del canale di Cento in modo da consentire il passaggio dei mezzi operativi consorziali verso valle sfruttando la salita e discesa dal Raccordo; la continuità rispetto all'interferenza adiacente dell'Autostrada Cispadana viene garantita mediante il sottopassaggio realizzato con il ponte del rilevato autostradale.

5. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

5.1. CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE

Il Canale di Cento è uno dei principali canali di bonifica della pianura ferrarese e rappresenta un lungo asse di drenaggio delle valli di pianura un tempo attraversate del Reno. Il canale nasce all'estremo sud ovest del comprensorio di bonifica al Ponte della Mora di Castel Vecchio, attraversa l'abitato di Cento e scorre con prevalente direzione sud-nord parallelamente al Cavo Napoleonico ricevendo gli importanti contributi del Condotto Generale in sinistra e del Canale Angelino in destra. Il Cento sottopassa il Cavo Napoleonico in località Ponte della Vela e prosegue verso nord-est raccogliendo i contributi dei sottobacini Savenuzza e Tassone in destra idraulica, raggiunge a nord il confine del polesine ferrarese e prosegue verso est raccogliendo i contributi da destra del sottobacino Poretto. Confluisce nel Canale Emissario di Burana alle porte della città di Ferrara. Il canale scorre arginato per la maggior parte del suo corso con argini che progressivamente si innalzano sulla campagna a partire dalla SP Buonacompra-S.Agostino. Il bacino complessivo del Canale di Cento ha superficie $S=138,92 \text{ km}^2$ con asta di lunghezza $L=44,658 \text{ km}$.

La sezione di chiusura è stata fissata in corrispondenza dell'interferenza con il Raccordo Bondeno-Cento 1km a nord di Buonacompra. Il tratto studiato sottende un sottobacino di estensione ridotta e comprendente il sottobacino di testa a monte di Cento oltre ad alcuni contributi più modesti distribuiti lungo l'asta; i principali sottobacini confluiscono infatti nel Canale di Cento a valle dell'attraversamento autostradale. Il bacino sotteso alla sezione di Cispadana, individuato su base CTR, ha una superficie di $S=11.70 \text{ km}^2$, circa il 8% dell'intero bacino e lunghezza dell'asta $L=19.897 \text{ km}$ poco meno della metà dell'intero corso d'acqua. La quota massima di bacino è pari a 22 msm e la minima è pari a 10 msm sul piano campagna e 8.5 msm a fondo alveo; il dislivello complessivo è di 12 m.

Il Canale di Cento, nel tratto di studio (attraversamento Cento I) non ha affluenti di sinistra in quanto tutte le acque del comprensorio in sinistra Cento sono drenate dal Condotto Generale che confluisce a valle della sezione di chiusura. Gli affluenti di destra sono quelli presenti in testa al bacino: Fossa Viazza, canale promiscuo, $L=1406 \text{ m}$; Scolo Reno Vecchio, canale promiscuo $L=695 \text{ m}$; Fosso Scolatore, canale promiscuo $L=2974 \text{ m}$; Scolo Traversante, canale di scolo $L=796 \text{ m}$; Scolo Bagnetto, 4459 m ; oltre quest'ultimo, che confluisce nel Canale di Cento alla progressiva 7535 m, non si hanno altre immissioni fino alla sezione di chiusura della Cispadana. Le acque del medio bacino di destra sono drenate dal Canale Angelino che confluisce nel Canale di Cento a valle della sezione di chiusura.

L'attraversamento Cento II è ubicato a valle delle confluenze del Condotto Generale e del canale Angelino ed il bacino ad esso afferente risulta maggiorato dei contributi di questi due importanti canali di bonifica.

| | | |
|--------------------------------------|--------|-----------------|
| Area del bacino | 11,70\ | km ² |
| Lunghezza dell'asta principale | 19,897 | km |
| Elevazione massima del bacino | 22,0 | msm |
| Elevazione della sezione di chiusura | 8,5 | msm |
| Distanza dalla foce | 24,761 | km |

TABELLA 5-1: CANALE DI CENTO I, CARATTERISTICHE FISICHE ALLA SEZIONE DI ATTRAVERSAMENTO BONDENO-CENTO

Nel tratto studiato il canale presenta sezione arginata regolare e costante con argini in rilevato sul piano campagna di circa 1 m e sezione interna bagnata di forma trapezoidale con sponde molto ripide; il canale scorre per un buon tratto parallelo alla SP Piastrello-Casumaro il cui sedime stradale costituisce l'argine di destra del canale; a valle dopo aver attraversato con una curva stretta e angolata, la SP il canale prosegue con tracciato debolmente sinuoso in adiacenza alla strada Frutteti in destra del canale. A valle la strada Frutteti raggiunge C.na Trevisani ed il canale torna ad essere affiancato dalla SP di Correggio in sinistra idraulica fino a quando sottopassa la strada medesima verso nord e poi attraversa il Cavo Napoleonico. Su entrambi i lati è garantito il transito dei mezzi del Consorzio di bonifica per la manutenzione ed ispezione, a tratti eseguita sfruttando le strade provinciali ed a tratti sfruttando le viabilità comunali e interpoderali. La sezione del canale è interamente naturale lungo tutto il corso; gli attraversamenti esistenti sono realizzati con ponticelli ad arco ribassato in muratura che spesso costituiscono una sezione strozzata rispetto a quella a cielo aperto.

La morfologia della sezione caratteristica nei pressi dell'attraversamento I può essere schematizzata con argini sopraelevati di 1 m rispetto alla campagna, la larghezza da ciglio a ciglio arginale è di 11 m, la larghezza al fondo è di 4 m e la profondità massima dal coronamento arginale è di 2.5 m, le sponde hanno scarpa 2.5 (b) :3,2 (h). Alla ponte Trevisani la sezione è più ampia in quanto il canale ha ricevuto i copiosi contributi provenienti dal Condotto Generale e Canale Angelino, la larghezza superiore è di 19m, la larghezza al fondo è di 6m e l'altezza massima di 3.6m.

Nell'ambito del progetto sono state svolte indagini specialistiche finalizzate alla determinazione delle caratteristiche idrografiche ed ambientali del corso d'acqua; si riporta nel seguito la scheda di censimento da cui emergono tali rilevamenti prima per l'attraversamento Cento I e poi per l'attraversamento Cento II.

| | |
|--------|------------------------|
| CODICE | 1FEA022 |
| NOME | CANALE DI CENTO |

| | | |
|--------------|--|---------------|
| DATA RILIEVO | 03/08/2011 | |
| PROPRIETA' | demaniale | |
| ENTE GESTORE | Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara | |
| LOCALITA' | S.Maria Bonazza | |
| COMUNE | Cento | |
| PROVINCIA | Ferrara | |
| PROGRESSIVA | 2+800 | |
| FOTOGRAFIE | 1FEA022_1.jpg | 1FEA022_2.jpg |

| | | |
|-------------------------------|----------------|---|
| UBICAZIONE | GAUSS BOAGA X | 1686032.77 |
| | GAUSS BOAGA Y | 4965234.67 |
| CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE | BACINO (km2) | 138.92 |
| | LUNGHEZZA (m) | 44658 |
| | SORGENTE | scoli campagne |
| | FOCE | Canale di Burana |
| CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE | TIPO TRACCIATO | rettilineo in adiacenza alla strada con curve angolate |
| | TIPO SEZIONE | arginato |
| | TIPO ALVEO | sezione in terra di forma trapezoidale con fondo largo e sponde ripide $B > H$, pensile con arginature a valle dell'interferenza |
| | EROSIONI | erosioni di sponda per cedimenti al piede che danno luogo a locali franamenti |
| CARATTERISTICHE CORSO D'ACQUA | RANGO | principale |
| | USO | promiscuo |

| | | | |
|-------------------------------|---|----|--|
| | GRANULOMETRIA | | <i>ciottoli e limi</i> |
| | AMBIENTE FLUVIALE | | <i>canale di origine artificiale rinaturalizzato - sponde inerbite mantenute, presenza di canneto - assenza di fascia riparia - assenza di rivestimenti artificiali - fauna ittica(pescegatto) ed anfibia, mammiferi di piccola taglia</i> |
| CARATTERISTICHE DEL PAESAGGIO | TERRITORIO CIRCOSTANTE | | <i>campagna aperta alle porte dell'abitato di Casumaro, coltivazioni a mais e cerealicole, strade carraie e cascine - vegetazione arborea ed arbustiva ad elementi singoli isolati</i> |
| CARATTERISTICHE IDRAULICHE | CONDIZIONI CONTRONO | AL | <i>corrente lenta: pendenza di moto uniforme a valle</i> |
| | SCABREZZA Gauckler-Strickler | | <i>21-24</i> |
| NOTE | <i>ponte della SP Pilastrello-Casumaro in muratura ad arco - assenza di difese idrauliche</i> | | |





| | |
|--------|------------------------|
| CODICE | 1FEA014 |
| NOME | CANALE DI CENTO |

| | | |
|--------------|--|---------------|
| DATA RILIEVO | 03/08/2011 | |
| PROPRIETA' | demaniale | |
| ENTE GESTORE | Consorzio di Bonifica Pianura di Ferrara | |
| LOCALITA' | Ponte Trevisani | |
| COMUNE | Bondeno | |
| PROVINCIA | Ferrara | |
| PROGRESSIVA | 6+300 | |
| FOTOGRAFIE | 1FEA014_1.jpg | 1FEA014_2.jpg |

| | | |
|------------|---------------|------------|
| UBICAZIONE | GAUSS BOAGA X | 1688732.62 |
|------------|---------------|------------|

| | | |
|-------------------------------|--|--|
| | GAUSS BOAGA Y | 4967012.54 |
| CARATTERISTICHE IDROGRAFICHE | BACINO (km2) | 138.92 |
| | LUNGHEZZA (m) | 44658 |
| | SORGENTE | scoli campagne |
| | FOCE | Canale di Burana |
| CARATTERISTICHE MORFOLOGICHE | TIPO TRACCIATO | misto con tratti sinuosi alternati a tratti rettilinei, lunghi tratti adiacenti alle strade |
| | TIPO SEZIONE | arginato |
| | TIPO ALVEO | sezione in terra di forma trapezoidale con fondo largo e sponde ripide B»H, pensile con arginature di circa 1m sopra il livello campagna |
| | EROSIONI | erosioni di sponda per cedimenti al piede |
| CARATTERISTICHE CORSO D'ACQUA | RANGO | principale |
| | USO | promiscuo |
| | GRANULOMETRIA | limi e argille |
| | AMBIENTE FLUVIALE | canale di origine artificiale rinaturalizzato - sponde inerbite mantenute, presenza saltuaria di elofite - assenza di fascia riparia - assenza di rivestimenti artificiali - fauna ittica ed anfibia, avifauna, mammiferi di piccola taglia (nutrie) |
| CARATTERISTICHE DEL PAESAGGIO | TERRITORIO CIRCOSTANTE | campagna aperta con coltivazioni di ortaggi e cerealicole, strade carraie e cascine - alberi ed arbusti isolati |
| CARATTERISTICHE IDRAULICHE | CONDIZIONI CONTRONO | AL corrente lenta: pendenza di moto uniforme a valle |
| | SCABREZZA Gauckler-Strickler | 21-24 |
| NOTE | ponte Trevisani a luce unica in CA con intradosso a quota inferiore a quella arginale - assenza di difese idrauliche | |



5.2. CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E MORFOLOGICHE DELL'ALVEO (TENDENZA MORFO-EVOLUTIVA DEL CORSO D'ACQUA)

Nel primo tratto oggetto di intervento il corso d'acqua ha andamento rettilineo adiacente alla strada provinciale, a monte si osserva una curva dolce mentre a valle è presente una curva estremamente angolata sulla quale insiste il ponte della SP Buonacompra-Casumaro, realizzato in muratura e che strozza la sezione a cielo aperto. Nel secondo tratto il canale ha andamento più sinuoso e rimane affiancato in sinistra dalla SP di Correggio.

L'indagine idraulica è stata sviluppata in forma univoca da Predio Garandina a sud di Buonacompra fino a Prà di sopra a nord est di Casumaro. La struttura d'alveo nel tratto d'interesse è ovunque unicursale di sezione trapezoidale con sponde a pendenza variabile spesso soggette ad erosioni causate dall'alternanza di livello idrico; la sezione è debolmente arginata rispetto alla campagna circostante.

Avendo constatato che le opere idrauliche in progetto non determinano riduzione della sezione disponibile al deflusso e non essendoci effetti laminativi per assenza di aree golenali, sono state effettuate simulazioni idrauliche in moto permanente (stazionario). La soluzione in moto stazionario, rispetto ad una analisi in termini di colmo di piena fornita da un'analisi in moto vario, fornisce condizioni di verifica sensibilmente più cautelative e, specialmente in corrispondenza dei manufatti di attraversamento, consente di impostare un confronto corretto tra diverse formulazioni per la stima delle perdite di carico.

Il modello geometrico utilizzato è stato costruito sulla base dei rilievi topografici propedeutici alla progettazione definitiva eseguiti nell'anno 2011 da ARCOS; il rilievo si compone di 36 sezioni trasversali, che rappresentano in modo esaustivo l'alveo e la campagna circostante; il tratto rilevato e restituito è di circa 7800m.

I valori di scabrezza assunti tengono conto della combinazione di diversi fattori che intervengono nella caratterizzazione delle perdite distribuite durante un evento di piena:

- caratteristiche granulometriche del materiale d'alveo,
- caratteristiche morfologiche e geometriche quali il grado di sinuosità del tratto d'alveo e brusche variazioni di geometria della sezione;
- caratterizzazione della copertura vegetale presente nelle zone spondali.

Sulla base dei sopralluoghi effettuati e dei riferimenti bibliografici che si riconducono ai principali studi in materia su corsi d'acqua analoghi si sono assunti valori della scabrezza in funzione della copertura vegetale e del tipo e granulometria del materiale presente in alveo; in generale si è sempre discretizzata la sezione idraulica bagnata associando valori diversi di scabrezza in relazione alle variabili sopradette.

I valori provenienti dalla modellizzazione idraulica sono stati ottenuti, assumendo un coefficiente di Strickler

di $K_{G-S}=28 \text{ m/s}^{1/3}$ per l'alveo inciso e $K_{G-S}=25 \text{ m/s}^{1/3}$ per le sponde vegetate; per i tratti rivestiti si sono adottate scabrezze $K_{G-S}=40 \text{ m/s}^{1/3}$. I valori adottati trovano conforto nei valori presenti in letteratura nelle pubblicazioni: "Open-Channel Hydraulics" - V.T. Chow, 1959, Macgraw-Hill, Singapore e da "Meccanica dei fluidi", Marchi - Rubatta.

Di seguito si riporta il profilo longitudinale del thalweg e delle sponde del Canale di Cento nel tratto vallivo in cui ricade l'attraversamento di progetto.

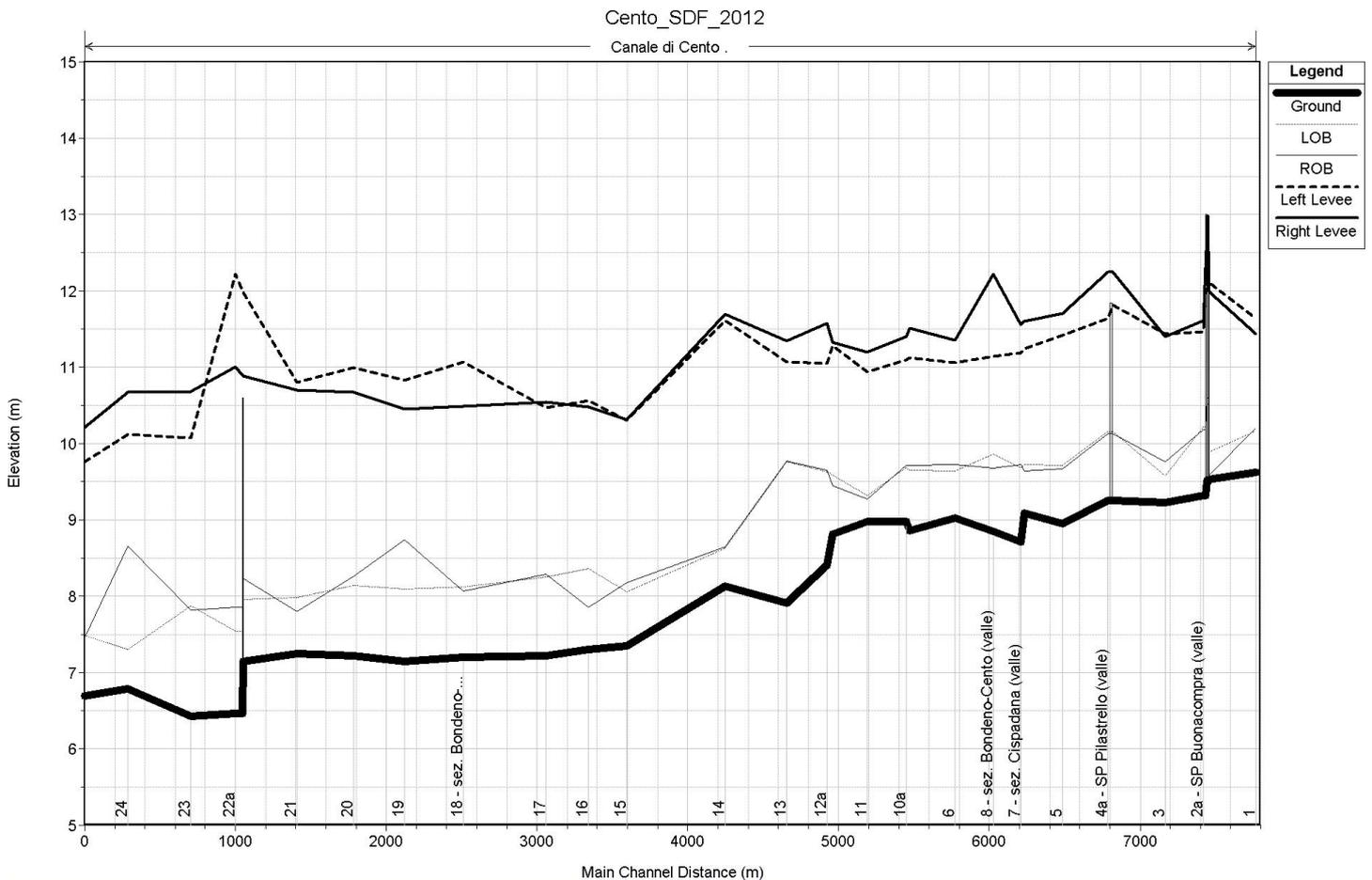


FIGURA 5-1: ANDAMENTO LONGITUDINALE DEL THALWEG E DELLE SPONDE NEL TRATTO DI CANALE ANALIZZATO

6. DEFINIZIONE DELLE PORTATE DI RIFERIMENTO

La determinazione delle portate di riferimento alla sezione Cento I è stata ricavata mediante analisi di trasformazione afflussi-deflussi con metodo cinematico a partire dalle piogge di riferimento per determinare i valori di portata massima al colmo per assegnato tempo di ritorno; essa ha lo scopo di ottenere un valore di riferimento per le portate con tempo di ritorno: TR=20 anni, caratteristico per i territori di bonifica e segnalato dal Consorzio come valore di riferimento per la loro pianificazione e progettazione; TR=100 anni come limite massimo indicato nella Direttiva 4 dell'Autorità di bacino del Po. Il modello sintetico di trasformazione afflussi-deflussi individua valori del coefficiente idrometrico che trovano conforto in quelli usualmente adottati dal Consorzio di Bonifica nella progettazione dei propri interventi sulla rete idrografica.

I parametri di calcolo utilizzati sono: area del bacino $S=11,7091 \text{ km}^2$, lunghezza asta principale $L=19,897 \text{ km}$, tempo di corrivazione $t_c=14.7 \text{ ore}$. Si ricavano le seguenti informazioni idrologiche.

| | | |
|-----------------------------------|------|------|
| tempo di ritorno (anni) | 20 | 100 |
| coefficiente di deflusso | 0.30 | 0.38 |
| portata (m^3/s) | 6.6 | 10.5 |

TABELLA 6-1: CANALE DI CENTO, PORTATE CARATTERISTICHE ALLA SEZIONE CENTO I

La massima portata sostenibile dal canale è stata fissata in $Q_{\max}=7.0 \text{ mc/s}$, essa corrisponde, sulla scala di durata del Canale di Cento, ad un tempo di ritorno compreso tra 40 e 50 anni.

Alla sezione Cento II il bacino del canale risulta più ampio per i contributi riversati a monte della sezione di riferimento dal Condotto Generale e dallo Scolo Bastardo, affluenti di sinistra idraulica.

| | | |
|-----------------------------------|----|-----|
| tempo di ritorno (anni) | 20 | 100 |
| portata (m^3/s) | 30 | 38 |

TABELLA 6-2: CANALE DI CENTO, PORTATE CARATTERISTICHE ALLA SEZIONE CENTO II

Il Canale di Cento è un canale ad uso promiscuo con funzionamento a gravità per la condizione di drenaggio e scolo delle acque meteoriche. Nelle verifiche idrauliche si adotta, come condizione allo scarico, la totale capacità recettiva del Canale di Burana ancorché, per le portate superiori alla venticinquennale, essa presupporrebbe interventi di adeguamento dell'intera rete consorziale oggi non immaginabili.

La portata massima sostenibile è relativa al tratto analizzato e rappresenta il limite oltre il quale l'acqua può fuoriuscire dalla sezione incisa in alcuni punti dello stesso.

7. VERIFICHE IDRAULICHE

7.1. ATTRAVERSAMENTO ED OPERE IDRAULICHE CONNESSE

7.1.1. Ponte sul Canale di Cento I

L'attraversamento in progetto sul Canale di Cento I avverrà con ponte a luce unica con impalcati separati per la via nord e sud, entrambi appoggiati su spalle esterne ai cigli spondali, arretrate di 2.0m in sinistra ed 1.5m in destra al fine di rispettare le indicazioni del Consorzio; il ponte ha luce 16m (misurata lungo l'asse di tracciamento che risulta essere quasi ortogonale al canale).

L'intradosso dell'impalcato, a seguito delle verifiche idrauliche successivamente descritte ed in funzione della livelletta stradale che richiede il raccordo a rotatoria con la SP di Pilastrello, è stato imposto ad una quota di 12,00 msm ciò consente di realizzare un franco d'aria di 70cm che nonostante sia inferiore al minimo richiesto dal Consorzio è stato concordato per evitare ulteriori innalzamenti dei rilevati autostradali che risultano dipendenti dalla quota del ponte e quindi della rotatoria sulla SP.

La continuità di passaggio dei mezzi consorziali ai fini della manutenzione delle sponde e fondo del canale viene garantita con la pista di servizio in sinistra, raccordata direttamente alla Bondeno-Cento mediante rampa di accesso e la SP in destra.

Si prevede la realizzazione di opere accessorie di difesa spondale e di fondo, opportunamente dimensionate al fine di proteggere le sponde e l'alveo da possibili erosioni localizzate; tali difese sono state prolungate a monte e valle dell'impalcato al fine di stabilizzare la sezione idraulica di progetto, modestamente risagomata, lungo tutto l'intervento. La tipologia e dimensione delle difese recepisce quanto prescritto dal Consorzio di bonifica in sede di CdS.

7.1.2. Ponte sul Canale di Cento II

L'attraversamento in progetto sul Canale di Cento II avverrà con ponte a luce unica con impalcati separati per la via nord e sud, entrambi appoggiati su spalle esterne ai cigli spondali, arretrate di 3.7m in sinistra ed 4.8m in destra al fine di rispettare le distanze minime richieste dal Consorzio; il ponte ha luce 29m (misurata lungo l'asse di tracciamento che risulta essere inclinato a 115° rispetto al canale).

L'intradosso dell'impalcato, a seguito delle verifiche idrauliche successivamente descritte ed in funzione della livelletta stradale, è stato imposto ad una quota di 12,62 msm ciò consente di realizzare un franco d'aria di

1.80m superiore al minimo richiesto dal Consorzio nonché previsto dalle Direttive e dalle NTC.

La continuità di passaggio dei mezzi consorziali ai fini della manutenzione delle sponde e fondo del canale viene garantita attraverso la connessione delle strade interpoderali esistenti alle piste di servizio specificatamente realizzate tali da collegare il ponte Trevisani e consentire quindi anche il passaggio di sponda. La continuità monte e valle risulta garantita attraverso il superamento diretto del Raccordo sfruttando le rampe dirette di accesso.

Si prevede la realizzazione di opere accessorie di difesa spondale e di fondo, opportunamente dimensionate al fine di proteggere le sponde e l'alveo da possibili erosioni localizzate; tali difese sono state prolungate a monte e valle dell'impalcato al fine di stabilizzare la sezione idraulica di progetto, modestamente risagomata, lungo tutto l'intervento. La tipologia e dimensione delle difese recepisce quanto prescritto dal Consorzio di bonifica in sede di CdS.

7.2. VERIFICA DI COMPATIBILITÀ IDRAULICA STATO DI FATTO - STATO DI PROGETTO

7.2.1. Condizioni di riferimento

Le condizioni al contorno per il calcolo dei profili di rigurgito sono le seguenti:

- rappresentazione geometrica del corso d'acqua nello stato di fatto ricavata dal rilievo topografico composto da 36 sezioni per una lunghezza complessiva di 7800m oltre alle sezioni specifiche dei ponti esistenti;
- rappresentazione geometrica del corso d'acqua nello stato di progetto ottenuta integrando quella esistente con l'opera di scavalco e con le relative opere idrauliche a corredo, difese spondali, rialzi arginali, ecc...;
- lo scarico del Canale di Cento avviene a gravità e libero nel Collettore di Burana con deflusso in condizioni di corrente lenta non rigurgitata, si assume come condizione al contorno di monte e valle, per il modello matematico, la pendenza di fondo attuale;
- portata di riferimento alla sezione Cento I: $Q_{max}=7 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{100}=10.5 \text{ m}^3/\text{s}$;
- portata di riferimento alla sezione Cento II: $Q_{max}=33 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{100}=38 \text{ m}^3/\text{s}$.

I calcoli idraulici per la definizione del profilo di inviluppo di piena sono stati svolti con riferimento alle seguenti condizioni fisiche del corso d'acqua:

- configurazione attuale;
- configurazione di progetto con la presenza dei nuovi attraversamenti e delle opere idrauliche di difesa e protezione; la configurazione di progetto comprende, oltre ai ponti del Raccordo Bondeno-Cento anche il nuovo ponte dell'autostrada Cispadana.

7.2.2. Risultati delle analisi idrauliche e verifica del franco di sicurezza dell'attraversamento

La verifica idraulica consiste nella determinazione delle principali caratteristiche con cui si propagano le onde di piena secondo la descrizione geometrica dell'alveo, sia nello stato di fatto che in quelli di progetto.

Le risultanze delle propagazioni nelle configurazioni simulate consistono nell'espore le principali grandezze idrauliche, soprattutto in termini di livelli idrometrici raggiunti durante gli eventi considerati in corrispondenza delle varie sezioni trasversali del corso d'acqua. Inoltre, risultano rilevate le velocità medie della corrente nei singoli tratti dell'alveo sia in condizioni di alveo attuale che di progetto.

Stato di fatto Cento I

Dall'analisi emerge che la portata di progetto transita all'interno del canale senza provocare fuoriuscite d'acqua, il livello raggiunto è 11.10msm di poco inferiore alla quota arginale; la portata monosecolare raggiunge livelli di 11.38msm non contenuti in alveo con conseguenti allagamenti nelle campagne circostanti. Dall'analisi dei profili di rigurgito della corrente lungo l'intero tratto simulato sono evidenti criticità idrauliche per insufficienza delle sezioni di deflusso in corrispondenza di alcuni ponti che generano rigurgiti verso monte ed allagamenti localizzati.

Il franco tra il livello idrometrico di massima piena e le sponde è negativo e si osserva dall'immagine seguente che il livello di massima piena è inferiore, di circa 6cm, rispetto alla quota spondale minima; viceversa il livello della piena centennale è superiore di 22cm rispetto alla sponda.

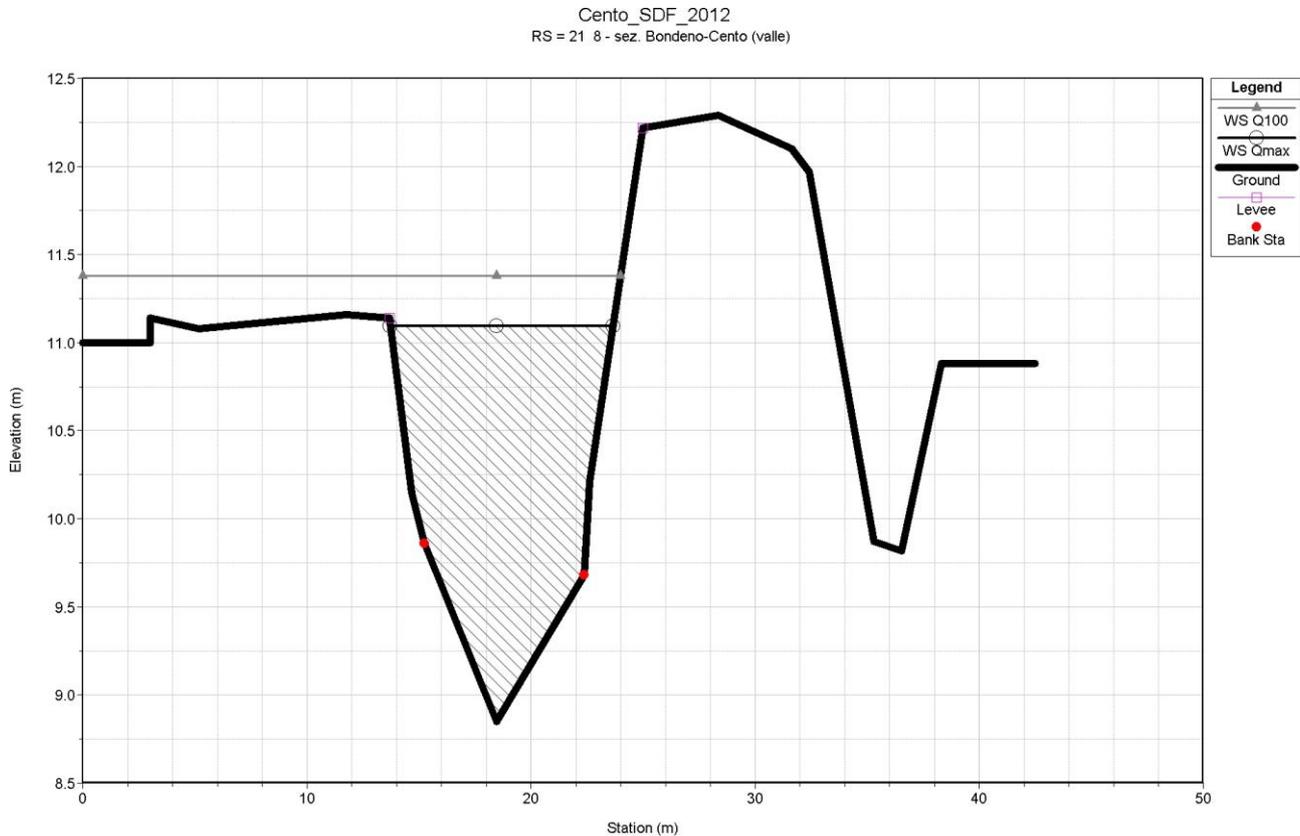


FIGURA 7-1: LIVELLO IDROMETRICO PER Q_{MAX} E Q_{100} ALLA SEZIONE TRASVERSALE DEL PONTE CENTO I NELLO STATO DI FATTO

Stato di fatto Cento II

Dall'analisi emerge che entrambe le portate di studio transitano all'interno del canale senza provocare fuoriuscite d'acqua, il livello raggiunto è 10.34msm di poco inferiore alla quota arginale per la portata massima e di 10.43msm per la portata centennale. Dall'analisi dei profili di rigurgito della corrente lungo l'intero tratto simulato sono evidenti criticità idrauliche per insufficienza delle sezioni di deflusso al transito della portata centennale tra le sezioni 2 e 11 e tra le sezioni 15 e 17; quest'ultimo tratto risulta critico anche per il transito della portata massima.

Il franco tra il livello idrometrico di massima piena e le sponde è negativo e si osserva dall'immagine seguente che il livello di massima piena è inferiore, di circa 15cm, rispetto alla quota spondale minima; il livello della piena centennale è inferiore di 6cm rispetto alla sponda.

Cento_SDF_2012
 RS = 9 18 - sez. Bondeno-Cento (monte)

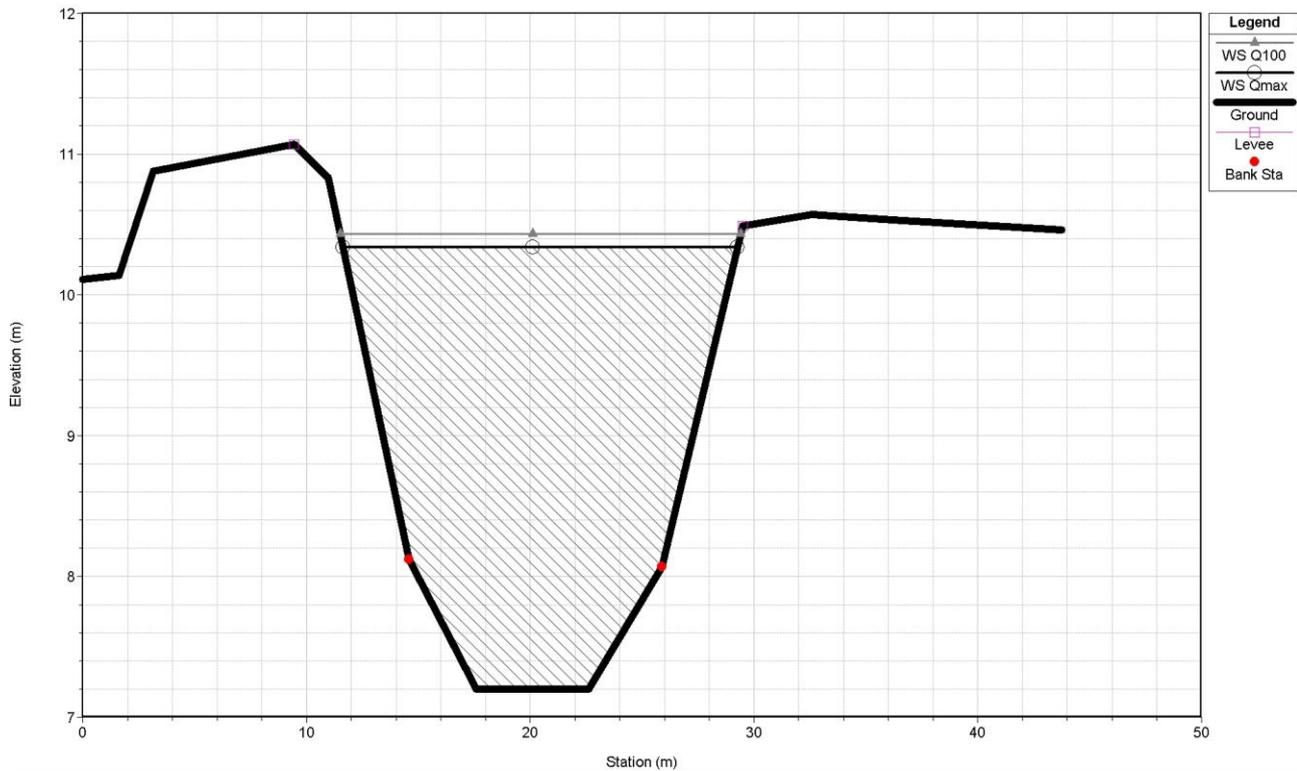


FIGURA 7-2: LIVELLO IDROMETRICO PER Q_{MAX} E Q_{100} ALLA SEZIONE TRASVERSALE DEL PONTE CENTO II NELLO STATO DI FATTO

Stato di progetto Cento I

La configurazione di progetto prevede la realizzazione di un ponte a luce unica con impalcato e spalle esterni alla sezione del canale e tali da consentire il deflusso delle portate di piena in forma indisturbata e senza rigurgiti. Nell'ambito del progetto è inoltre previsto il rizezionamento del canale, con allargamento della sezione al fine di costruire una sezione con sponde a scarpa 3/2. Il progetto prevede l'intradosso del ponte ad un altezza minima di 70cm rispetto alla quota di massima piena.

Il franco tra il livello idrometrico e l'intradosso del ponte risulta $F_{max}=70\text{cm}$ e $F_{100}=50\text{cm}$.

Cento_PRJ_2012
RS = 21.5 BR ponte BondenoCento

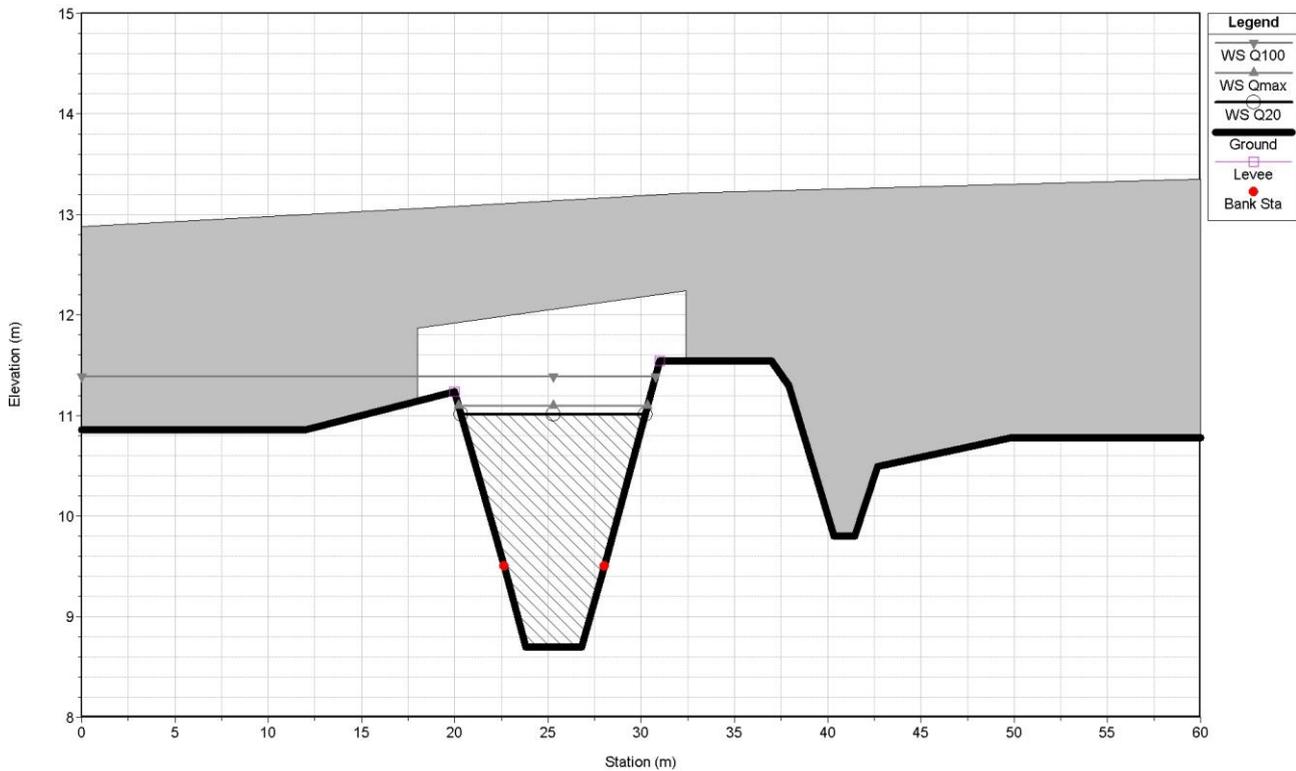


FIGURA 7-3: LIVELLO IDROMETRICO PER Q_{MAX} E Q_{100} ALLA SEZIONE TRASVERSALE DEL PONTE CENTO I NELLO STATO DI PROGETTO

Stato di progetto Cento II

La configurazione di progetto prevede la realizzazione di un ponte a luce unica con impalcato e spalle esterni alla sezione del canale e tali da consentire il deflusso delle portate di piena in forma indisturbata e senza rigurgiti. Nell'ambito del progetto è inoltre previsto il risezionamento del canale, con allargamento della sezione al fine di costruire una sezione con sponde a scarpa 3/2. Il progetto prevede l'intradosso del ponte ad una quota di 13.62 garantendo il franco idraulico richiesto.

Il franco tra il livello idrometrico e l'intradosso del ponte risulta $F_{max}=2.30m$ e $F_{100}=2.20m$.

Cento_PRJ_2012
RS = 8.5 BR ponte Bondeno Cento

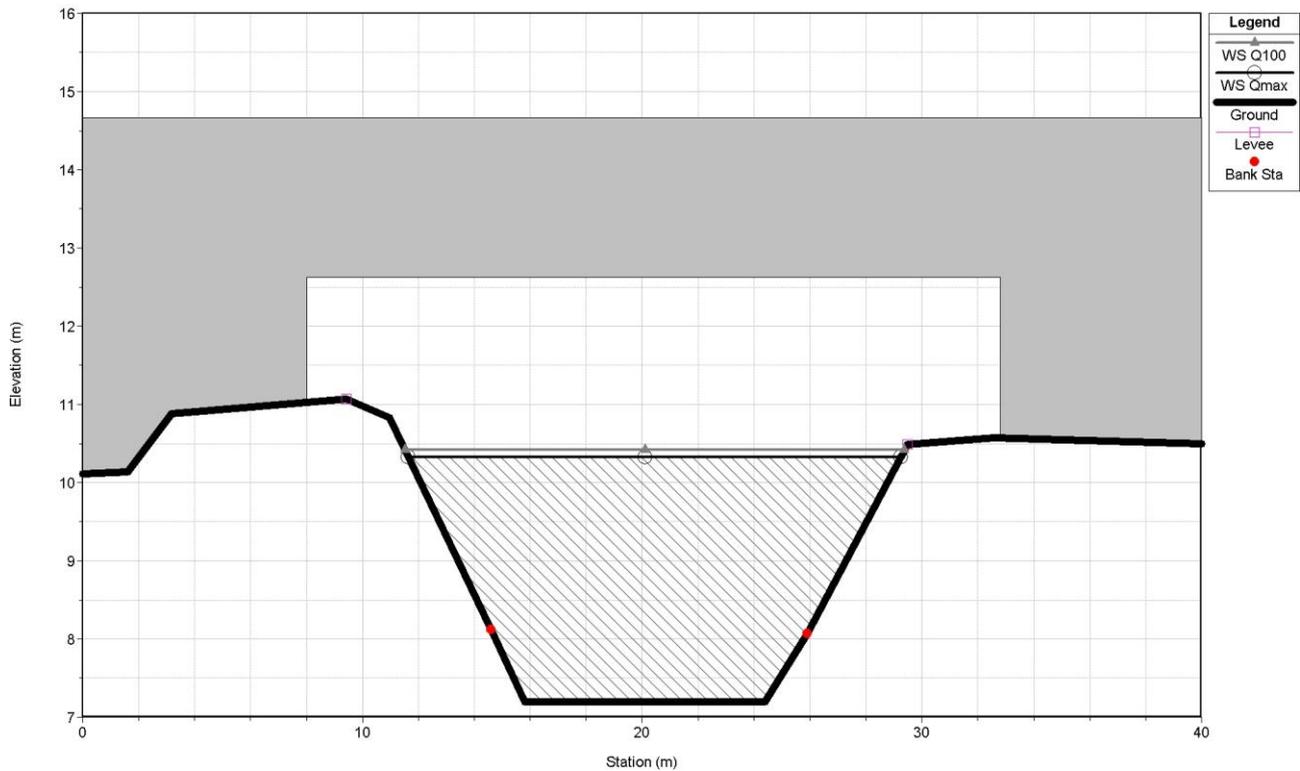


FIGURA 7-4: LIVELLO IDROMETRICO PER Q_{MAX} E Q_{100} ALLA SEZIONE TRASVERSALE DEL PONTE CENTO II NELLO STATO DI PROGETTO

Confronto Stato di fatto – Stato di progetto

Di seguito si riportano i risultati delle simulazioni numeriche eseguite per portata la portata massima e per la portata centennale, rispettivamente, alla situazione attuale e di progetto. Nelle tabelle e nei grafici seguenti si riporta il confronto fra le principali grandezze idrauliche di riferimento relative alle simulazioni eseguite.

| Sezioni | Sezioni H-C | Progressive | Quota fondo (m) | Pendenza | Portata Qmax (m ³ /s) | Livello SF (m) | Livello SP (m) | Velocità SF (m/s) | Velocità SP (m/s) | Energia SF (m) | Energia SP (m) | Froude SF | Froude SP |
|----------------------|-------------|-------------|-----------------|----------|----------------------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 31 | 0 | 9,62 | 0,0003 | 7,0 | 11,50 | 11,47 | 0,42 | 0,43 | 11,51 | 11,49 | 0,22 | 0,23 |
| 1a | 30 | 307 | 9,53 | 0,0000 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,67 | 0,68 | 11,43 | 11,40 | 0,19 | 0,20 |
| ponte Matazzola | 29.5 BR U | 308 | 9,53 | 0,0040 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,79 | 0,81 | 11,43 | 11,40 | 0,19 | 0,19 |
| ponte Matazzola | 29.5 BR D | 313 | 9,51 | 0,0000 | 7,0 | 11,39 | 11,36 | 0,86 | 0,87 | 11,43 | 11,40 | 0,20 | 0,21 |
| 2 | 29 | 318 | 9,51 | 0,0000 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,57 | 0,58 | 11,42 | 11,39 | 0,15 | 0,16 |
| ponte SP Buonacompra | 28.5 BR U | 320 | 9,51 | 0,0190 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,57 | 0,59 | 11,42 | 11,39 | 0,13 | 0,14 |
| ponte SP Buonacompra | 28.5 BR D | 330 | 9,32 | 0,0000 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,55 | 0,56 | 11,42 | 11,39 | 0,13 | 0,13 |

| Sezioni | Sezioni H-C | Progressi ve | Quota fondo (m) | Pendenz a | Portata Qmax (m3/s) | Livello SF (m) | Livello SP (m) | Velocità SF (m/s) | Velocità SP (m/s) | Energia SF (m) | Energia SP (m) | Froude SF | Froude SP |
|---------------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| 2a | 28 | 346 | 9,32 | 0,0004 | 7,0 | 11,40 | 11,37 | 0,53 | 0,54 | 11,41 | 11,38 | 0,16 | 0,16 |
| 3 | 27 | 597 | 9,23 | -0,0001 | 7,0 | 11,35 | 11,31 | 0,49 | 0,50 | 11,36 | 11,33 | 0,15 | 0,15 |
| 4 | 26 | 947 | 9,25 | 0,0000 | 7,0 | 11,27 | 11,23 | 0,58 | 0,60 | 11,29 | 11,25 | 0,17 | 0,18 |
| ponte SP Pilastrello | 25.5 BR U | 952 | 9,25 | 0,0000 | 7,0 | 11,26 | 11,22 | 0,63 | 0,65 | 11,29 | 11,25 | 0,14 | 0,15 |
| ponte SP Pilastrello | 25.5 BR D | 962 | 9,25 | 0,0000 | 7,0 | 11,26 | 11,22 | 0,63 | 0,65 | 11,28 | 11,24 | 0,15 | 0,15 |
| 4a | 25 | 978 | 9,25 | 0,0010 | 7,0 | 11,26 | 11,22 | 0,58 | 0,60 | 11,28 | 11,24 | 0,17 | 0,18 |
| 5 | 24 | 1277 | 8,95 | -0,0006 | 7,0 | 11,19 | 11,14 | 0,54 | 0,55 | 11,21 | 11,16 | 0,16 | 0,16 |
| 6 | 23 | 1531 | 9,09 | 0,0000 | 7,0 | 11,13 | 11,10 | 0,59 | 0,61 | 11,15 | 11,12 | 0,17 | 0,18 |
| ponte Cispadana (monte) | 22.5 BR U | 1532 | 9,09 | 0,0152 | 7,0 | | 11,10 | | 0,61 | | 11,12 | | 0,18 |
| ponte Cispadana (valle) | 22.5 BR D | 1557 | 8,71 | 0,0000 | 7,0 | | 11,10 | | 0,57 | | 11,12 | | 0,16 |
| 7 | 22 | 1558 | 8,71 | 0,0002 | 7,0 | 11,13 | 11,10 | 0,56 | 0,57 | 11,14 | 11,12 | 0,16 | 0,16 |
| sez. progetto (monte) | 21,6 | 1603 | 8,70 | 0,0000 | 7,0 | | 11,10 | | 0,44 | | 11,11 | | 0,12 |
| ponte Bondeno- Cento (monte) | 21.5 BR U | 1605 | 8,70 | 0,0000 | 7,0 | | 11,10 | | 0,44 | | 11,11 | | 0,12 |
| ponte Bondeno- Cento (valle) | 21.5 BR D | 1615 | 8,70 | 0,0000 | 7,0 | | 11,10 | | 0,44 | | 11,11 | | 0,12 |
| sez. progetto (valle) | 21,4 | 1618 | 8,70 | -0,0012 | 7,0 | | 11,10 | | 0,44 | | 11,11 | | 0,12 |
| 8 | 21 | 1738 | 8,85 | -0,0007 | 7,0 | 11,10 | 11,08 | 0,48 | 0,48 | 11,11 | 11,10 | 0,13 | 0,14 |
| 9 | 20 | 1991 | 9,02 | 0,0005 | 7,0 | 11,02 | 11,01 | 0,66 | 0,67 | 11,05 | 11,04 | 0,20 | 0,20 |
| 10 | 19 | 2293 | 8,86 | -0,0058 | 7,0 | 10,92 | 10,90 | 0,65 | 0,66 | 10,94 | 10,92 | 0,20 | 0,20 |
| 10a | 18 | 2314 | 8,98 | 0,0000 | 7,0 | 10,90 | 10,89 | 0,70 | 0,71 | 10,93 | 10,92 | 0,22 | 0,22 |
| 11 | 17 | 2571 | 8,98 | 0,0007 | 7,0 | 10,80 | 10,77 | 0,67 | 0,69 | 10,83 | 10,80 | 0,21 | 0,22 |
| 12 | 16 | 2805 | 8,81 | 0,0119 | 7,0 | 10,69 | 10,65 | 0,74 | 0,77 | 10,72 | 10,69 | 0,24 | 0,25 |
| 12a | 15 | 2839 | 8,41 | 0,0018 | 7,0 | 10,68 | 10,65 | 0,64 | 0,65 | 10,70 | 10,67 | 0,18 | 0,19 |
| 13 | 14 | 3109 | 7,91 | -0,0005 | 7,0 | 10,64 | 10,61 | 0,44 | 0,45 | 10,65 | 10,62 | 0,11 | 0,11 |
| 14 | 13 | 3517 | 8,13 | 0,0012 | 7,0 | 10,58 | 10,54 | 0,59 | 0,60 | 10,60 | 10,56 | 0,13 | 0,13 |
| 15 | 12 | 4167 | 7,35 | 0,0002 | 11,0 | 10,55 | 10,51 | 0,23 | 0,24 | 10,56 | 10,52 | 0,09 | 0,10 |
| 16 | 11 | 4423 | 7,30 | 0,0003 | 31,0 | 10,51 | 10,46 | 0,57 | 0,67 | 10,53 | 10,49 | 0,19 | 0,17 |
| 17 | 10 | 4704 | 7,22 | 0,0000 | 31,0 | 10,46 | 10,42 | 0,66 | 0,68 | 10,49 | 10,44 | 0,17 | 0,17 |
| 18 | 9 | 5252 | 7,20 | 0,0000 | 33,0 | 10,34 | 10,33 | 0,83 | 0,80 | 10,38 | 10,37 | 0,19 | 0,18 |
| sez. progetto (monte) | 8,6 | 5268 | 7,20 | 0,0000 | 33,0 | | 10,33 | | 0,80 | | 10,36 | | 0,18 |
| ponte Bondeno- Cento (monte) | 8.5 BR U | 5270 | 7,20 | 0,0000 | 33,0 | | 10,33 | | 0,80 | | 10,36 | | 0,18 |
| ponte Bondeno- Cento (valle) | 8.5 BR D | 5280 | 7,20 | 0,0000 | 33,0 | | 10,33 | | 0,80 | | 10,36 | | 0,18 |
| sez. progetto (valle) | 8,4 | 5288 | 7,20 | 0,0000 | 33,0 | | 10,33 | | 0,80 | | 10,36 | | 0,18 |
| sez. progetto | 8,3 | 5298 | 7,20 | 0,0001 | 33,0 | | 10,32 | | 0,80 | | 10,36 | | 0,18 |
| 19 | 8 | 5643 | 7,15 | -0,0002 | 33,0 | 10,24 | 10,24 | 0,82 | 0,82 | 10,28 | 10,28 | 0,18 | 0,18 |

| Sezioni | Sezioni H-C | Progressive | Quota fondo (m) | Pendenza | Portata Qmax (m3/s) | Livello SF (m) | Livello SP (m) | Velocità SF (m/s) | Velocità SP (m/s) | Energia SF (m) | Energia SP (m) | Froude SF | Froude SP |
|----------------|-------------|-------------|-----------------|----------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| 20 | 7 | 5982 | 7,22 | -0,0001 | 38,0 | 10,10 | 10,10 | 1,03 | 1,03 | 10,16 | 10,16 | 0,24 | 0,24 |
| 21 | 6 | 6357 | 7,25 | 0,0003 | 38,0 | 9,93 | 9,93 | 1,02 | 1,02 | 9,99 | 9,99 | 0,25 | 0,25 |
| 22 | 5 | 6711 | 7,15 | 0,0000 | 38,0 | 9,73 | 9,73 | 1,14 | 1,14 | 9,80 | 9,80 | 0,27 | 0,27 |
| ponte poderale | 4.5 BR U | 6713 | 7,15 | 0,1150 | 38,0 | 9,73 | 9,73 | 1,14 | 1,14 | 9,80 | 9,80 | 0,23 | 0,23 |
| ponte poderale | 4.5 BR D | 6719 | 6,46 | 0,0000 | 38,0 | 9,72 | 9,72 | 1,17 | 1,17 | 9,80 | 9,80 | 0,22 | 0,22 |
| 22a | 4 | 6766 | 6,46 | 0,0001 | 38,0 | 9,69 | 9,69 | 1,18 | 1,18 | 9,77 | 9,77 | 0,27 | 0,27 |
| 23 | 3 | 7062 | 6,43 | -0,0009 | 38,0 | 9,59 | 9,59 | 0,98 | 0,98 | 9,64 | 9,64 | 0,22 | 0,22 |
| 24 | 2 | 7480 | 6,79 | 0,0004 | 38,0 | 9,32 | 9,32 | 1,32 | 1,32 | 9,41 | 9,41 | 0,32 | 0,32 |
| 25 | 1 | 7764 | 6,69 | | 38,0 | 8,21 | 8,21 | 3,19 | 3,19 | 8,76 | 8,76 | 1,02 | 1,02 |

TABELLA 7-1: CANALE DI CENTO, PRINCIPALI GRANDEZZE IDRAULICHE A CONFRONTO NELLO SF E NELLO SP CON PORTATA QMAX

| Sezioni | Sezioni H-C | Progressive | Quota fondo (m) | Pendenza | Portata Q100 (m3/s) | Livello SF (m) | Livello SP (m) | Velocità SF (m/s) | Velocità SP (m/s) | Energia SF (m) | Energia SP (m) | Froude SF | Froude SP |
|-----------------------------|-------------|-------------|-----------------|----------|---------------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 31 | 0 | 9,62 | 0,0003 | 10,5 | 11,79 | 11,78 | 0,29 | 0,29 | 11,80 | 11,79 | 0,15 | 0,15 |
| 1a | 30 | 307 | 9,53 | 0,0000 | 10,5 | 11,68 | 11,67 | 0,83 | 0,84 | 11,73 | 11,71 | 0,24 | 0,24 |
| ponte Matazzola | 29.5 BR U | 308 | 9,53 | 0,0040 | 10,5 | 11,67 | 11,66 | 1,03 | 1,04 | 11,72 | 11,71 | 0,23 | 0,23 |
| ponte Matazzola | 29.5 BR D | 313 | 9,51 | 0,0000 | 10,5 | 11,66 | 11,65 | 1,10 | 1,11 | 11,72 | 11,71 | 0,24 | 0,24 |
| 2 | 29 | 318 | 9,51 | 0,0000 | 10,5 | 11,68 | 11,67 | 0,72 | 0,72 | 11,71 | 11,70 | 0,17 | 0,18 |
| ponte SP Buonacompri | 28.5 BR U | 320 | 9,51 | 0,0190 | 10,5 | 11,68 | 11,67 | 0,72 | 0,73 | 11,71 | 11,70 | 0,16 | 0,16 |
| ponte SP Buonacompri | 28.5 BR D | 330 | 9,32 | 0,0000 | 10,5 | 11,68 | 11,66 | 0,70 | 0,70 | 11,70 | 11,69 | 0,15 | 0,15 |
| 2a | 28 | 346 | 9,32 | 0,0004 | 10,5 | 11,68 | 11,67 | 0,37 | 0,38 | 11,70 | 11,68 | 0,23 | 0,23 |
| 3 | 27 | 597 | 9,23 | -0,0001 | 10,5 | 11,63 | 11,62 | 0,37 | 0,38 | 11,65 | 11,63 | 0,26 | 0,27 |
| 4 | 26 | 947 | 9,25 | 0,0000 | 10,5 | 11,53 | 11,51 | 0,72 | 0,73 | 11,56 | 11,54 | 0,21 | 0,21 |
| ponte SP Pilastrello | 25.5 BR U | 952 | 9,25 | 0,0000 | 10,5 | 11,52 | 11,50 | 0,82 | 0,83 | 11,56 | 11,54 | 0,18 | 0,18 |
| ponte SP Pilastrello | 25.5 BR D | 962 | 9,25 | 0,0000 | 10,5 | 11,52 | 11,49 | 0,82 | 0,83 | 11,55 | 11,53 | 0,18 | 0,18 |
| 4a | 25 | 978 | 9,25 | 0,0010 | 10,5 | 11,51 | 11,49 | 0,73 | 0,74 | 11,54 | 11,52 | 0,21 | 0,21 |
| 5 | 24 | 1277 | 8,95 | -0,0006 | 10,5 | 11,47 | 11,44 | 0,34 | 0,35 | 11,48 | 11,45 | 0,15 | 0,15 |
| 6 | 23 | 1531 | 9,09 | 0,0000 | 10,5 | 11,42 | 11,41 | 0,41 | 0,41 | 11,44 | 11,42 | 0,18 | 0,17 |
| ponte Cispadana (monte) | 22.5 BR U | 1532 | 9,09 | 0,0152 | 10,5 | | 11,39 | | 0,66 | | 11,42 | | 0,24 |
| ponte Cispadana (valle) | 22.5 BR D | 1557 | 8,71 | 0,0000 | 10,5 | | 11,39 | | 0,61 | | 11,42 | | 0,22 |
| 7 | 22 | 1558 | 8,71 | 0,0002 | 10,5 | 11,42 | 11,40 | 0,40 | 0,40 | 11,43 | 11,41 | 0,17 | 0,17 |
| sez. progetto (monte) | 21,6 | 1603 | 8,70 | 0,0000 | 10,5 | | 11,40 | | 0,37 | | 11,41 | | 0,16 |
| ponte Bondeno-Cento (monte) | 21.5 BR U | 1605 | 8,70 | 0,0000 | 10,5 | | 11,39 | | 0,54 | | 11,41 | | 0,16 |

| Sezioni | Sezioni H-C | Progressi ve | Quota fondo (m) | Pendenz a | Portata Q100 (m3/s) | Livello SF (m) | Livello SP (m) | Velocità SF (m/s) | Velocità SP (m/s) | Energia SF (m) | Energia SP (m) | Froude SF | Froude SP |
|----------------------------------|-------------|-----------------|-----------------------|--------------|---------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|--------------|--------------|
| ponete Bondeno- Cento (valle) | 21.5 BR D | 1615 | 8,70 | 0,0000 | 10,5 | | 11,39 | | 0,54 | | 11,41 | | 0,16 |
| sez. progetto (valle) | 21,4 | 1618 | 8,70 | -0,0012 | 10,5 | | 11,39 | | 0,37 | | 11,41 | | 0,16 |
| 8 | 21 | 1738 | 8,85 | -0,0007 | 10,5 | 11,38 | 11,37 | 0,49 | 0,50 | 11,40 | 11,39 | 0,20 | 0,21 |
| 9 | 20 | 1991 | 9,02 | 0,0005 | 10,5 | 11,31 | 11,30 | 0,55 | 0,55 | 11,33 | 11,33 | 0,27 | 0,28 |
| 10 | 19 | 2293 | 8,86 | -0,0058 | 10,5 | 11,21 | 11,20 | 0,52 | 0,53 | 11,23 | 11,22 | 0,25 | 0,25 |
| 10a | 18 | 2314 | 8,98 | 0,0000 | 10,5 | 11,19 | 11,18 | 0,65 | 0,66 | 11,22 | 11,21 | 0,34 | 0,35 |
| 11 | 17 | 2571 | 8,98 | 0,0007 | 10,5 | 11,05 | 11,03 | 0,73 | 0,75 | 11,09 | 11,08 | 0,37 | 0,38 |
| 12 | 16 | 2805 | 8,81 | 0,0119 | 10,5 | 10,89 | 10,86 | 0,95 | 0,96 | 10,94 | 10,92 | 0,29 | 0,30 |
| 12a | 15 | 2839 | 8,41 | 0,0018 | 10,5 | 10,88 | 10,85 | 0,83 | 0,85 | 10,92 | 10,90 | 0,23 | 0,24 |
| 13 | 14 | 3109 | 7,91 | -0,0005 | 10,5 | 10,81 | 10,79 | 0,60 | 0,61 | 10,83 | 10,81 | 0,14 | 0,15 |
| 14 | 13 | 3517 | 8,13 | 0,0012 | 10,5 | 10,70 | 10,67 | 0,84 | 0,86 | 10,74 | 10,70 | 0,18 | 0,18 |
| 15 | 12 | 4167 | 7,35 | 0,0002 | 14,0 | 10,67 | 10,63 | 0,26 | 0,27 | 10,68 | 10,64 | 0,10 | 0,11 |
| 16 | 11 | 4423 | 7,30 | 0,0003 | 35,0 | 10,62 | 10,58 | 0,58 | 0,61 | 10,65 | 10,61 | 0,24 | 0,25 |
| 17 | 10 | 4704 | 7,22 | 0,0000 | 35,0 | 10,58 | 10,53 | 0,54 | 0,71 | 10,60 | 10,56 | 0,22 | 0,22 |
| 18 | 9 | 5252 | 7,20 | 0,0000 | 38,0 | 10,43 | 10,42 | 0,92 | 0,89 | 10,48 | 10,47 | 0,21 | 0,19 |
| sez. progetto (monte) | 8,6 | 5268 | 7,20 | 0,0000 | 38,0 | | 10,42 | | 0,89 | | 10,47 | | 0,19 |
| ponete Bondeno- Cento (monte) | 8.5 BR U | 5270 | 7,20 | 0,0000 | 38,0 | | 10,42 | | 0,89 | | 10,47 | | 0,19 |
| ponete Bondeno- Cento (valle) | 8.5 BR D | 5280 | 7,20 | 0,0000 | 38,0 | | 10,42 | | 0,89 | | 10,46 | | 0,19 |
| sez. progetto (valle) | 8,4 | 5288 | 7,20 | 0,0000 | 38,0 | | 10,42 | | 0,89 | | 10,46 | | 0,19 |
| sez. progetto | 8,3 | 5298 | 7,20 | 0,0001 | 38,0 | | 10,41 | | 0,89 | | 10,46 | | 0,20 |
| 19 | 8 | 5643 | 7,15 | -0,0002 | 38,0 | 10,31 | 10,31 | 0,92 | 0,92 | 10,36 | 10,36 | 0,20 | 0,20 |
| 20 | 7 | 5982 | 7,22 | -0,0001 | 40,0 | 10,17 | 10,17 | 1,05 | 1,05 | 10,23 | 10,23 | 0,24 | 0,24 |
| 21 | 6 | 6357 | 7,25 | 0,0003 | 40,0 | 10,00 | 10,00 | 1,04 | 1,04 | 10,06 | 10,06 | 0,25 | 0,25 |
| 22 | 5 | 6711 | 7,15 | 0,0000 | 40,0 | 9,80 | 9,80 | 1,16 | 1,16 | 9,87 | 9,87 | 0,27 | 0,27 |
| ponete poderale | 4.5 BR U | 6713 | 7,15 | 0,1150 | 40,0 | 9,80 | 9,80 | 1,17 | 1,17 | 9,87 | 9,87 | 0,24 | 0,24 |
| ponete poderale | 4.5 BR D | 6719 | 6,46 | 0,0000 | 40,0 | 9,79 | 9,79 | 1,20 | 1,20 | 9,87 | 9,87 | 0,22 | 0,22 |
| 22a | 4 | 6766 | 6,46 | 0,0001 | 40,0 | 9,76 | 9,76 | 1,20 | 1,20 | 9,84 | 9,84 | 0,28 | 0,28 |
| 23 | 3 | 7062 | 6,43 | -0,0009 | 40,0 | 9,65 | 9,65 | 1,01 | 1,01 | 9,71 | 9,71 | 0,23 | 0,23 |
| 24 | 2 | 7480 | 6,79 | 0,0004 | 40,0 | 9,37 | 9,37 | 1,35 | 1,35 | 9,47 | 9,47 | 0,32 | 0,32 |
| 25 | 1 | 7764 | 6,69 | | 40,0 | 8,25 | 8,25 | 3,23 | 3,23 | 8,81 | 8,81 | 1,02 | 1,02 |

TABELLA 7-2: CANALE DI CENTO, PRINCIPALI GRANDEZZE IDRAULICHE A CONFRONTO NELLO SF E NELLO SP CON PORTATA Q100

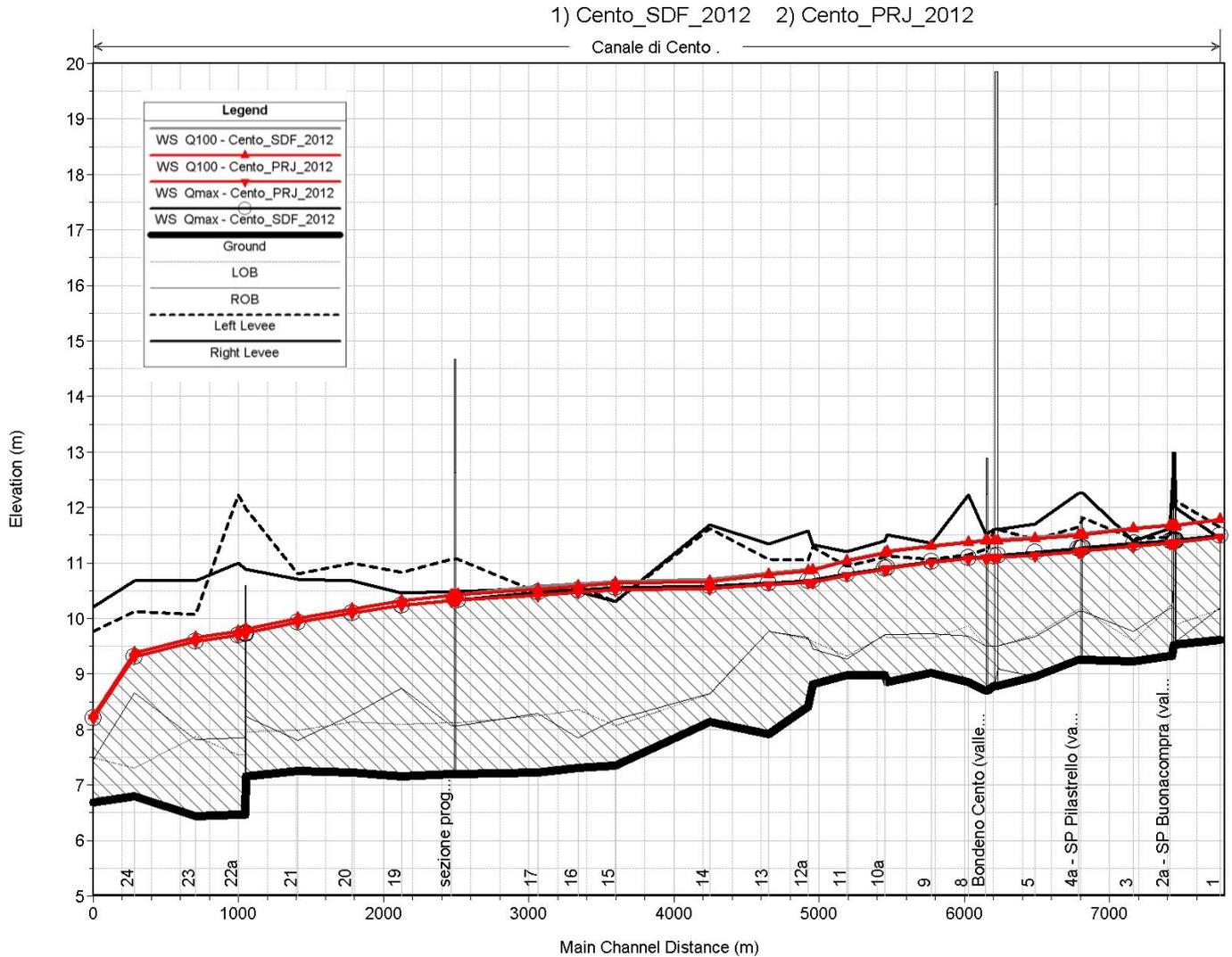


FIGURA 7-5: CANALE DI CENTO, CONFRONTO TRA I PROFILI DI RIGURGITO PER LE PORTATE Q_{MAX} E Q₁₀₀ NELLO SF E SP

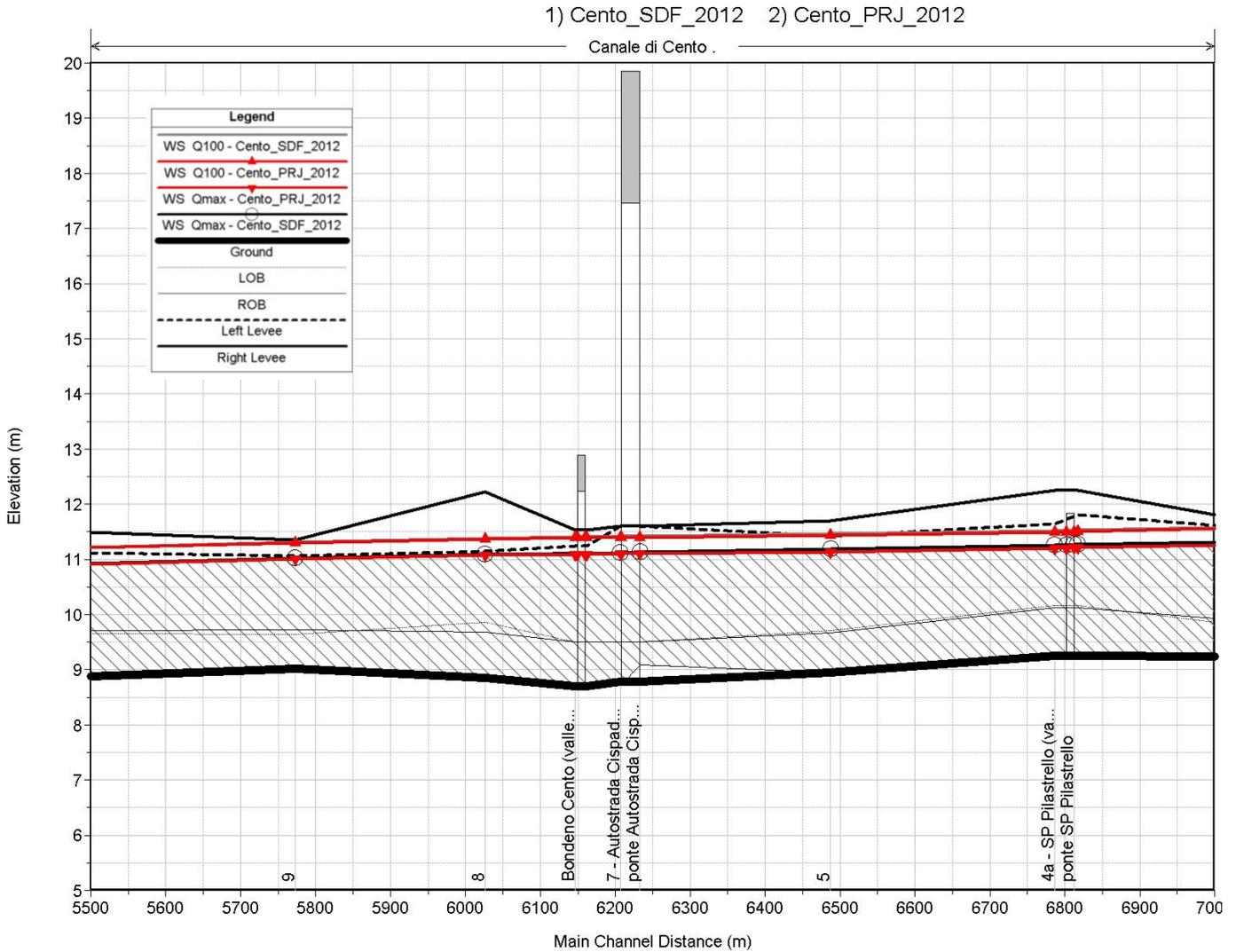


FIGURA 7-6: CANALE DI CENTO, CONFRONTO TRA I PROFILI DI RIGURGITO PER LE PORTATE QMAX E Q₁₀₀ NELLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO – DETTAGLIO ATTRAVERSAMENTO CENTO I

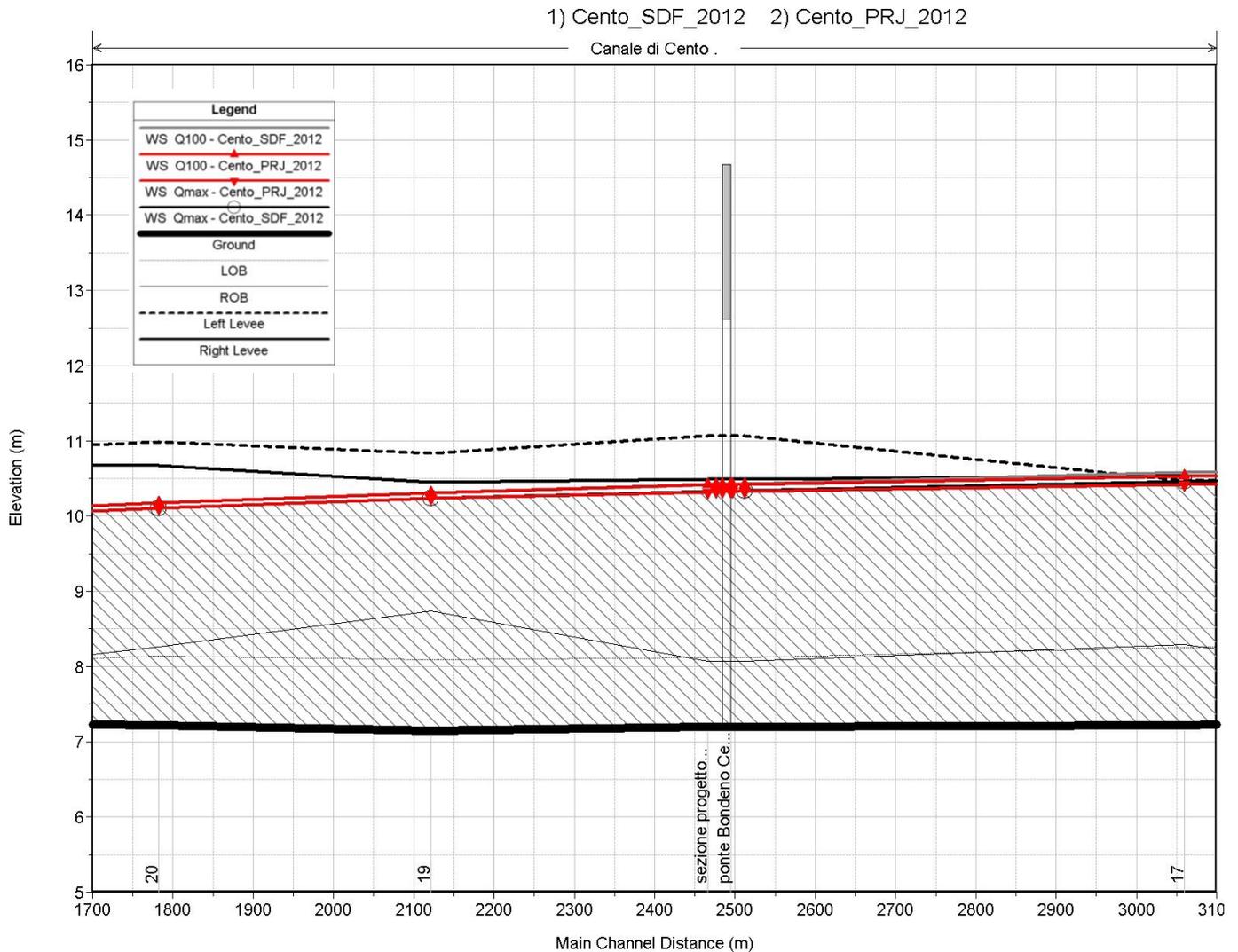


FIGURA 7-7: CANALE DI CENTO, CONFRONTO TRA I PROFILI DI RIGURGITO PER LE PORTATE QMAX E Q₁₀₀ NELLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO – DETTAGLIO ATTRAVERSAMENTO CENTO II

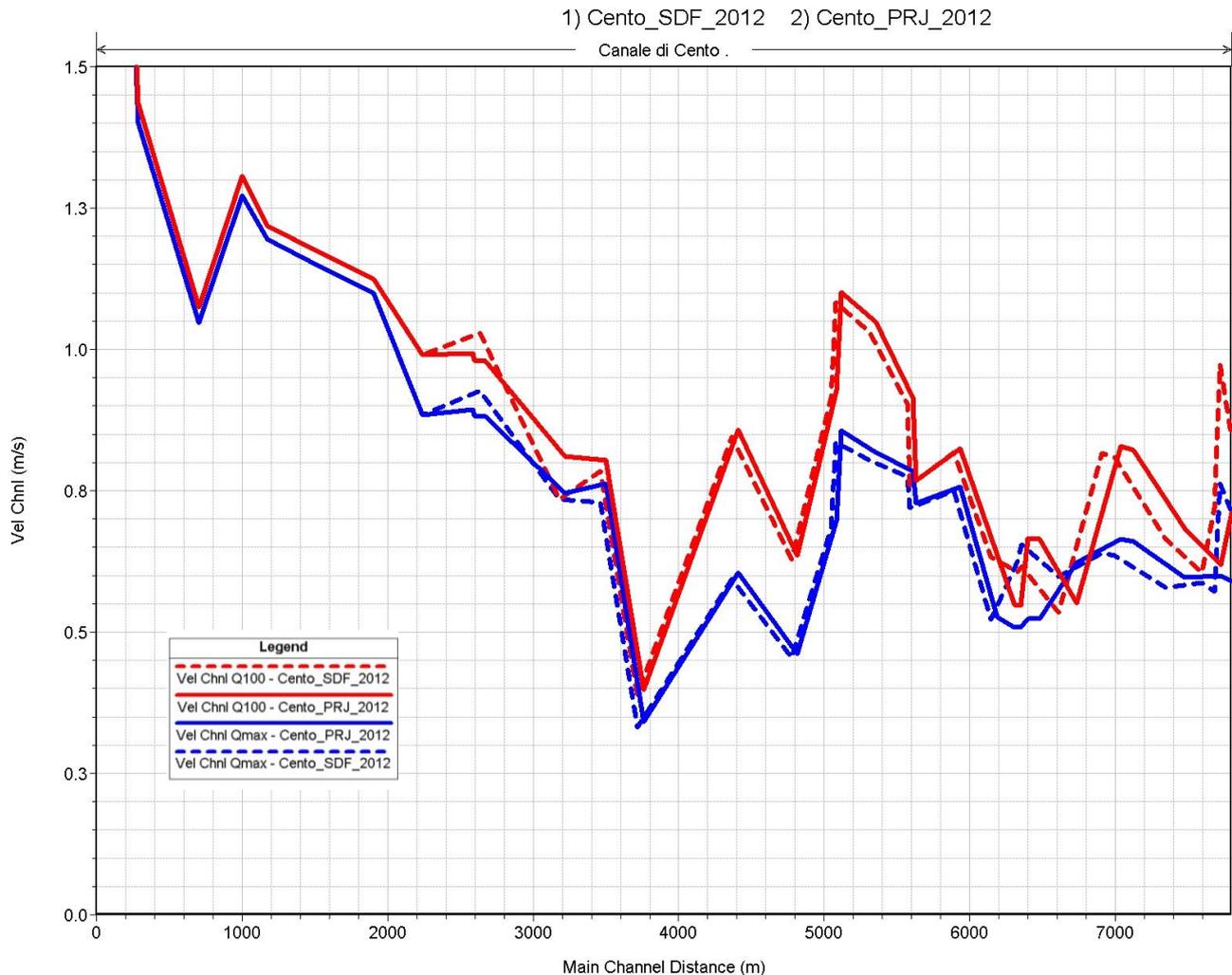


FIGURA 7-8: CANALE DI CENTO, ANDAMENTO DELLA VELOCITÀ MEDIE DELLA CORRENTE PER LE PORTATE NELLO STATO DI FATTO E DI PROGETTO

7.2.3. Valutazione della compatibilità idraulica attraversamento Cento I

Effetto E.1. Modifiche indotte sul profilo involuppo di piena.

Fattori determinanti: restringimenti di sezioni o ostacoli al deflusso nel tratto di corso d'acqua interessato.

Modalità di quantificazione: confronto tra il profilo di piena in condizioni indisturbate e ad intervento realizzato.

Dai risultati esposti precedentemente, sia in forma tabellare sia in forma grafica, dei profili di rigurgito calcolati per la portata di progetto Qmax ed a confronto anche per la portata Q100 nelle condizioni attuali e di progetto si evince che nelle sezioni interessate dalla costruzione del nuovo ponte i profili di piena sono quasi identici nella simulazione Ante opera ed in quella Post opera; nello specifico si osserva che il

risezionamento del canale ed il rivestimento spondale favoriscono un abbassamento di qualche centimetro dei livelli raggiunti dalla corrente di piena.

Effetto E.2. Riduzione della capacità di invaso dell'alveo.

Fattori determinanti: riduzioni delle superfici allagabili causate dalla realizzazione dell'intervento e l'effetto delle stesse in termini di diminuzione della laminazione in alveo lungo il tratto fluviale.

L'opera in progetto non comporta alcuna variazione delle superfici allagabili che per altro, per la specificità del corso d'acqua, sono limitate al solo alveo inciso.

Effetto E.3. Interazioni con le opere di difesa idrauliche (opere di sponda e argini) esistenti.

Fattori determinanti: localizzazione e caratteristiche strutturali degli elementi costituenti parte delle opere in progetto.

Modalità di quantificazione: valutazioni idrodinamiche sugli effetti idrodinamici indotti.

La situazione di progetto non determina variazioni idrodinamiche apprezzabili delle caratteristiche della corrente di piena rispetto alla situazione attuale; come si osserva dal precedente grafico sull'andamento medio delle velocità non si notano in corrispondenza del ponte variazioni apprezzabili e si verifica che la velocità si mantiene sempre inferiore a 0.8m/s.

Effetto E.4. Modifiche indotte sull'assetto morfologico planimetrico e altimetrico dell'alveo inciso e di piena.

Non si segnala alcuna modifica sostanziale dal punto di vista planimetrico né altimetrico dell'alveo né in regime ordinario né in piena.

Effetto E.5. Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale.

Fattori determinanti: opere in progetto e soluzioni di inserimento delle stesse nel sistema fluviale. L'inserimento del ponte non implica una modificazione delle attuali caratteristiche ambientali del corso d'acqua fatto salvo l'inserimento localizzato delle opere di difesa e protezione spondale.

Effetto E.6. Condizioni di sicurezza dell'intervento rispetto alla piena.

Fattori determinanti:

- condizioni di stabilità delle opere costituenti l'intervento in relazione alle sollecitazioni derivanti dalle

condizioni di deflusso in piena con riferimento in particolare agli effetti connessi ai livelli idrici di piena e a quelli derivanti dell'azione erosiva della corrente sulle strutture e sulle fondazioni;

- tipologia funzionale dell'intervento.

Il franco idraulico tra l'intradosso del ponte ed il livello idrometrico raggiunto dalla portata di progetto è di 0,70m; il franco idraulico relativo alla portata centennale è superiore a 0,50m.

7.2.4. Valutazione della compatibilità idraulica attraversamento Cento II

Effetto E.1. Modifiche indotte sul profilo involuppo di piena.

Dai risultati esposti precedentemente, sia in forma tabellare sia in forma grafica, dei profili di rigurgito calcolati per la portata di progetto Q_{max} ed a confronto anche per la portata Q_{100} nelle condizioni attuali e di progetto si evince che nelle sezioni interessate dalla costruzione del nuovo ponte i profili di piena sono quasi identici nella simulazione Ante opera ed in quella Post opera; nello specifico si osserva che il risezionamento del canale ed il rivestimento spondale favoriscono un abbassamento di qualche centimetro dei livelli raggiunti dalla corrente di piena.

Effetto E.2. Riduzione della capacità di invaso dell'alveo.

L'opera in progetto non comporta alcuna variazione delle superfici allagabili che per altro, per la specificità del corso d'acqua, sono limitate al solo alveo inciso.

Effetto E.3. Interazioni con le opere di difesa idrauliche (opere di sponda e argini) esistenti.

La situazione di progetto non determina variazioni idrodinamiche apprezzabili delle caratteristiche della corrente di piena rispetto alla situazione attuale; come si osserva dal precedente grafico sull'andamento medio delle velocità non si notano in corrispondenza del ponte variazioni apprezzabili e si verifica che la velocità si mantiene sempre inferiore a 1.0m/s.

Effetto E.4. Modifiche indotte sull'assetto morfologico planimetrico e altimetrico dell'alveo inciso e di piena.

Non si segnala alcuna modifica sostanziale dal punto di vista planimetrico né altimetrico dell'alveo né in regime ordinario né in piena.

Effetto E.5. Modifiche indotte sulle caratteristiche naturali e paesaggistiche della regione fluviale.

L'inserimento del ponte non implica una modificazione delle attuali caratteristiche ambientali del corso d'acqua fatto salvo l'inserimento localizzato delle opere di difesa e protezione spondale.

Effetto E.6. Condizioni di sicurezza dell'intervento rispetto alla piena.

Il franco idraulico tra l'intradosso del ponte ed il livello idrometrico raggiunto dalla portata di progetto è di 2,3m; il franco idraulico relativo alla portata centennale è superiore a 2,2m.

7.3. Verifica di compatibilità idraulica in presenza di opere provvisionali

La realizzazione dei nuovi ponti non richiede la predisposizione di opere provvisionali in quanto la costruzione delle spalle avviene dall'esterno senza interessare il corso d'acqua la cui funzionalità verrà mantenuta inalterata.

Non essendo previsti interventi di riduzione della sezione di deflusso durante la costruzione non risulta necessario sviluppare verifica di compatibilità idraulica per la fase provvisoria.

8. INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Sulla base di quanto già previsto in fase di Progetto Preliminare e di quanto prescritto dal Consorzio di bonifica della Pianura di Ferrara in sede di CdS nonché durante la fase di Progettazione Definitiva, si è proceduto alla progettazione dei presidi difensivi da apporre a protezione delle sponde e del fondo alveo sia sotto la luce del ponte di progetto sia fuori l'ombra del ponte per un conveniente intorno a monte e valle.

Gli interventi previsti sono suddivisi in 3 categorie:

- 1) difese longitudinali volte a contenere i processi erosivi sulle sponde e di fondo;
- 2) mantenimenti e collegamento della viabilità di servizio interferita;
- 3) realizzazione di ripristino delle aree di intervento.

La difesa spondale e di fondo si ottiene attraverso la realizzazione di una mantellata continua in massi di cava non gelivi di dimensioni 40-60cm/cad corrispondenti ad elementi variabili in peso da 100 a 300kg adottando massi di peso specifico dell'ordine dei 2400 kg/m³. La mantellata verrà realizzata sia sul fondo sia sulle sponde del canale garantendo uno spessore minimo omogeneo di 1m. Successivamente con il fine sia di stabilizzare i massi posati sia di preservare l'integrità delle sponde si provvederà all'intasamento della mantellata mediante getto di calcestruzzo magro a parziale intasamento delle fessure avendo cura di chiudere le porosità profonde e mantenendo liberi da calcestruzzo il paramento esterno ed i primi 20cm in modo da favorire l'inserimento ambientale e percettivo della difesa nel contesto naturale.

Per l'attraversamento Cento I le opere di difesa saranno estese a monte fino a raccordarsi a quelle previste nell'ambito della costruzione del ponte autostradale mentre a valle saranno estese per 10m oltre il ponte; la difesa è ovviamente prevista anche sotto l'ombra del ponte.

Per l'attraversamento Cento II le opere di difesa saranno estese a monte e valle per 10m; la difesa è ovviamente prevista anche sotto l'ombra del ponte.

Il mantenimento della continuità delle piste di manutenzione non può essere attuato nelle soluzioni di progetto in quanto si è cercato, in ottemperanza alle prescrizioni di CdS, di mantenere il rilavato del Raccordo Bondeno-Cento il più basso possibile sulla campagna. La continuità delle attività consorziali di sorveglianza e manutenzione potrà essere ottenuta sfruttando la percorrenza dei mezzi operativi sulle viabilità esistenti e sulle piste di servizio che le raccorderanno tra loro; il passaggio di sponda potrà essere effettuato attraverso lo stesso Raccordo Bondeno-Cento.

Una volta completate le opere idrauliche, si procederà ad effettuare il ripristino delle aree di intervento mediante sistemazione del terreno movimentato con opportune lavorazioni e con la finale semina a spaglio delle superfici lavorate. Per la semina saranno utilizzate rigorosamente solo essenze erbacee autoctone.