ITEC engineering

PORTS of GENOA
VADO LIGURE ■ SAVONA ■ PRA' ■ GENOA

Committente:
Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Occidentale

Livello di Progetto
Definitivo

Titolo:

SISTEMAZIONE DEL TRATTO TERMINALE DELL'ASTA DEL TORRENTE SEGNO FINALIZZATA ALLA MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDRAULICO

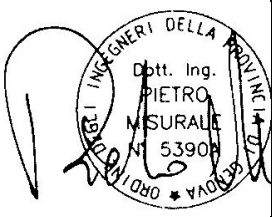
Oggetto:

RELAZIONE IDRAULICA

Codice Progetto:
P007-19

Nome File:
P007-19-D-RE-IDR-001-A

Firme:

Progettista Responsabile:	Progettista:	Visto del RUP:
		

Rev.	Modifiche/Revisioni	Redatto	Data	Contr./Appr.	Data
A	PRIMA EMISSIONE	DR	5/06/20	PM	5/06/20

ASSOCIATO oice CONFINDUSTRIA
efca FIDIC
apave certification ISO 9001 N° SC 10-2588/IAF 34 ISO 14001 N° SCA 19-3491/IAF

ITEC engineering S.r.l.
19038 SARZANA (SP)
Via Variante Aurelia, 98
TEL. +39 0187 610532
info@itec-engineering.it

16129 GENOVA
Via Antonio Cecchi 7/9-10
TEL. +39 010 5959690
www.itec-engineering.it

È vietata a norma di legge la riproduzione, anche parziale, non autorizzata di questo documento

INDICE

1 PREMESSA 2

2 DESCRIZIONE DEL TRATTO DI INTERESSE 3

3 NORMATIVA IDRAULICA DI RIFERIMENTO 5

4 INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA 9

4.1 SISTEMAZIONE COMPLESSIVA 9
4.2 PROGETTO DEFINITIVO 10

5 VERIFICHE IDRAULICHE 11

5.1 PORTATE DI RIFERIMENTO 11
5.2 METODOLOGIA DI CALCOLO 11
5.3 CONFIGURAZIONI DI VERIFICA E PARAMETRI DI CALCOLO 11
5.4 RISULTATI 12
5.4.1 Configurazione Intermedia - vasca vuota (A1) 12
5.4.2 Configurazione Intermedia - vasca piena (A2) 15
5.4.3 Configurazione Finale - vasca vuota (B1) 15
5.4.4 Configurazione Finale - vasca piena (B2) 17
5.4.5 Confronti con il comportamento idraulico in corrente lenta 17

Allegati:

ALLEGATO A: Verifiche idrauliche

Appendici:

APPENDICE 1: Software di calcolo HecRas 5.0.1

1 PREMESSA

La presente relazione fa parte del progetto definitivo relativo alla *Sistemazione idraulica del tratto terminale dell'asta del torrente Segno finalizzata alla mitigazione del rischio idraulico*.

Essa contiene le verifiche idrauliche del tratto terminale del torrente Segno compreso all'incirca tra il ponte Molo 8.44 e lo sbocco a mare, per una lunghezza di circa 1 km e costituisce un aggiornamento e un'integrazione della precedente relazione idraulica del 16/11/2015 dovuta a integrazioni e approfondimenti del rilievo topografico del corso d'acqua e delle aree adiacenti e alla modifica del profilo di progetto del fondo alveo a cavallo del passante ferroviario resasi necessaria per ridurre al minimo l'abbassamento del fondo alveo attuale in un tratto ambientalmente critico, recentemente sottoposto a bonifica.

Il progetto definitivo è stato elaborato sulla base del progetto preliminare redatto nel 2014 dall'Ing. Roberto Desalvo[1] per conto del Comune di Vado Ligure e dei relativi studi di approfondimento idraulico redatti dalla ITEC engineering per conto dell'Autorità Portuale di Savona.

Il progetto preliminare (con gli studi di approfondimento idraulico) è stato approvato dal Comitato Tecnico di Bacino nella seduta del 16/09/2014 con parere n. 21/2014.

Rispetto a quest'ultimo il progetto definitivo presenta alcune lievi variazioni in particolare per quanto riguarda l'assetto geometrico dell'alveo (larghezze), dovute principalmente agli approfondimenti delle indagini sui manufatti esistenti (muri d'argine, edifici argine) a alle analisi di maggior dettaglio effettuate nell'ambito della progettazione definitiva, che non comportano variazioni significative delle caratteristiche idrauliche della corrente per le portate di progetto.

[1] StAigeS Ingegneria S.r.l. Corso Italia 22/6 - 17100 Savona

2 DESCRIZIONE DEL TRATTO DI INTERESSE

Il torrente Segno sottende un bacino di circa 21 km^2 caratterizzato da una forma allungata (assimilabile ad un rettangolo) orientato in direzione OSO-ENE, di lunghezza di circa 10 km e larghezza 2.1 km, con acclività dei versanti compresa tra 35% e 75%.

La lunghezza dell'asta principale è di circa 10 km.

La cima più alta è rappresentata dalla Rocca dei Corvi (793 m s.l.m.) all'estremità occidentale del bacino.

Da un punto di vista geomorfologico il bacino è suddivisibile in tre parti principali con caratteristiche diverse:

- parte alta (fraz. Segno, San Bernardo, Cunio, ecc.) dove una minore acclività, dovuta alle caratteristiche geolitologico-geomorfologiche, ha consentito l'instaurarsi di attività agricole, silvicole e pastorali. In tale tratto l'alveo si presenta stretto ed incassato, caratterizzato da una pronunciata pendenza, che segue una direzione prevalente NO-SE con andamento poco articolato;
- parte mediana (fraz. Sant'Ermete, fraz. San Genesio) dove si è esercitata una forte azione antropica di disboscamento, sostituita da insediamenti recenti e da aree con attività agricole tradizionali. In tale tratto il corso d'acqua presenta un andamento più articolato e meandriforme sviluppandosi secondo una direzione OSE-ENE;
- parte valliva costituita da una zona prettamente urbana (porzione terminale) associata ad insediamenti industriali e artigianali. Il corso d'acqua risulta per tutto il tratto sostanzialmente rettilineo e arginato su entrambe le sponde sino alla foce mantenendo l'andamento prevalente OSE-ENE.

Il Piano di Bacino inserisce la maggior parte del bacino in classe di suscettività al dissesto medio bassa (colori giallo e verde).

Le maggiori criticità si riscontrano nella parte alta del bacino (Crinale di Rocca dei Corvi) con la presenza di aree in frana (ma di modesta entità) e lungo i versanti in sponda destra nella parte mediana del bacino (rio Rivassa), caratterizzato da una maggiore acclività e da un più marcato stato di abbandono.

Tali aree risultano tuttavia molto distanti dal tratto oggetto di intervento, che costituisce il tratto terminale dell'asta medio-valliva del corso d'acqua.

Nel Piano viene comunque rilevato che, per quanto riguarda i sottobacini sia in sponda sinistra che in sponda destra, la notevole e fitta copertura vegetale limita fortemente le condizioni predisponenti a fenomeni di ruscellamento diffuso e arealmente esteso, ad eccezione di qualche area in cui gli incendi hanno comportato una maggiore esposizione agli agenti erosivi.

Nel tratto terminale il torrente Segno scorre all'interno della piana alluvionale/costiera pressoché completamente urbanizzata, con una diminuzione progressiva delle pendenze da monte verso valle.

Quest'ultimo è costituito da un tronco rettilineo molto lungo (4-5 km) con pendenza modesta (intorno all'1% circa), che appare stabile, senza segni evidenti di dissesto.

In tale contesto la dimensione dei materiali costituenti il fondo alveo, inizialmente più grossolani quali ciottoli e ghiaie, diminuisce progressivamente verso la foce sino a granulometrie più fini quali sabbie.

L'azione dell'uomo ha progressivamente regolarizzato il corso d'acqua attraverso la realizzazione di argini di varia natura, per cui le erosioni spondali e le conseguenti divagazioni ed ampliamenti dell'alveo sono di fatto contrastati.

Il fondo alveo nel tratto focivo risulta stabile, con una traccia di canale più marcato in mezzeria e due aree a quota più elevata (mediamente di 0.4 m circa) ai lati, con presenza di un manto erboso sulla superficie.

Non sono evidenti lungo tale tratto e nemmeno lungo il tratto rettilineo di monte tracce di dissesti (erosioni, divagazioni, vegetazione infestante ecc.) che facciano pensare ad un possibile dissesto in caso di piena.

La stabilità del fondo è avvalorata dal fatto che l'alveo, pur non essendo stato soggetto nel tempo, almeno negli ultimi vent'anni, a pulizia e manutenzione, non ha subito né un marcato sovralluvionamento rispetto alla linea del talweg, né tantomeno fenomeni di erosione.

Il fondo alveo alla foce si è mantenuto a quote intorno a -0.3 m s.l.m., la barra fociva è contenuta con altezze massime di circa 1 m s.l.m.

3 NORMATIVA IDRAULICA DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento dal punto di vista idraulico è costituita dal Piano di Bacino Stralcio per la tutela dal rischio idrogeologico del torrente Segno - Ambito di Bacino di rilievo regionale Letimbro[2], ai sensi del D.L. 180/98 e s.m., e dal Regolamento Regionale n. 3 del 14/07/2011[3] così come modificato dalla DGR n. 181 del 11/03/2016;
La normativa idraulica di riferimento è costituita da:

Il torrente Segno fa parte del reticolo idrografico della Regione Liguria[4] e, nell'ambito del Piano, risulta "indagato" lungo tutto il suo sviluppo.

Nelle figure seguenti sono riportati gli estratti della cartografia regionale e del Piano di Bacino.

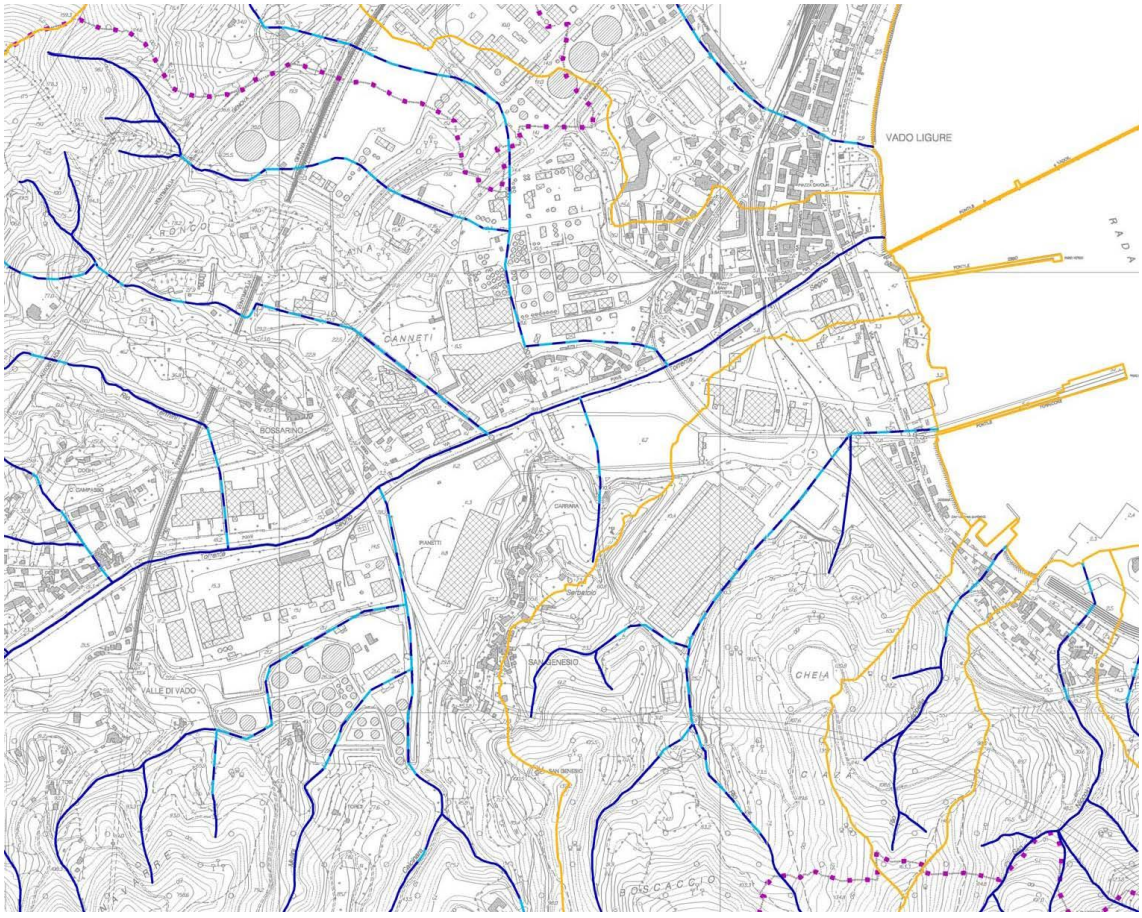


Figura 1: estratto carta del Reticolo idrografico regionale

2 Approvato con Delibera del Consiglio Provinciale n.47 del 25/11/2003
Ultima variante approvata con DdDG n. 176 del 25/06/2018 in vigore dall'11/07/2018.

3 *Disposizioni in materia di tutela delle aree di pertinenza dei corsi d'acqua*, attuativo della DGR 1360/2010.

4 DGR n. 507 del 21 giugno 2019.

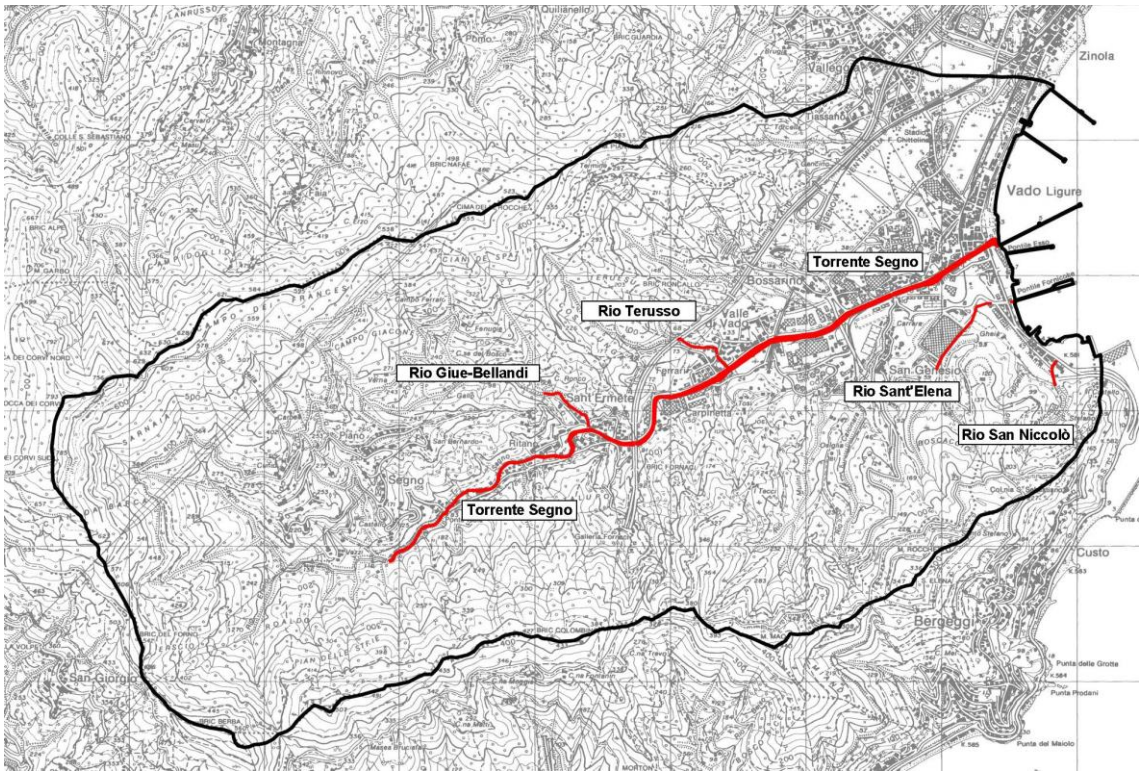


Figura 2: estratto carta dei tratti indagati nell'ambito del PdB

In base al Regolamento il torrente Segno è classificabile come corso d'acqua di primo livello (bacino maggiore di 1.0 km^2) per i quali è stabilita una fascia di inedificabilità assoluta dai limiti dell'alveo pari a 10 m.

Il Regolamento definisce inoltre i franchi minimi ammissibili tra il livello di piena e la sommità degli argini/intradosso dei ponti, e i parametri di scabrezza da assumere nelle verifiche idrauliche.

Per il reticolo idrografico di primo e secondo livello i franchi non devono essere inferiori al valore maggiore tra:

- carico cinetico della corrente determinabile come U^2/2g), dove U è la velocità media della corrente (m/s) e g è l'accelerazione di gravità (m/s^2);
- i valori della tabella seguente.

I	Argini e difese spondali	cm 50/100
II	Ponti e strutture di attraversamento fino ad estensioni longitudinali di 12 m	cm 100/150
III	Coperture e tombinature, ponti e strutture di attraversamento oltre 12 m	cm 150/200

Tabella I

Dove i due valori estremi corrispondono rispettivamente a bacini poco dissestati ed a bacini molto dissestati.

Per le opere di cui al punto III, nel caso di modesta rilevanza dell'opera stessa e di bacini sistemati, il franco può essere derogato dall'amministrazione competente a valori inferiori.

Il coefficiente di scabrezza da utilizzare nelle verifiche idrauliche, deve essere desunto dalla seguente tabella.

Descrizione	Coefficiente di scabrezza di Gauckler-Strickler
Tratti di corsi d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva-arborea in alveo	25-30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30-35
Tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35-40
Corso d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti o discontinuità interferenti con le acque	40-45

Tabella II

Il Piano di Bacino inserisce come aree inondabili per eventi di piena con tempo di ritorno di 50 anni (fascia A) quelle adiacenti al tratto d'alveo in esame compreso tra la foce e il passante ferroviario e una piccola area depressa lungo la sponda sinistra compresa tra il passante ferroviario e il ponte Molo 8.44.

Le restanti aree adiacenti al corso d'acqua risultano inondabili per eventi con tempo di ritorno pari a 200 anni (fascia B).

La criticità idraulica del tratto è dovuta a diverse cause tra cui le principali sono l'insufficiente altezza delle difese spondali, la presenza dei numerosi attraversamenti che interferiscono con il regolare deflusso delle portate di piena e la presenza di edifici argine nel tratto compreso tra la SS.Aurelia ed il ponte di Via Palestro.

Nella figura seguente è riportato un estratto della carta delle fasce di inondabilità del Piano di Bacino adottata con DGP n°30 del 11/02/2014 a seguito di recepimento delle prescrizioni e raccomandazioni espressi dal Comitato Tecnico di Bacino nella seduta del 19/06/2013[5].

[5] "Variante non sostanziale ai Piani di Bacino Stralcio della provincia di Savona per il recepimento del nuovo quadro conoscitivo relativamente alla pericolosità idraulica. - Bacino Segno"

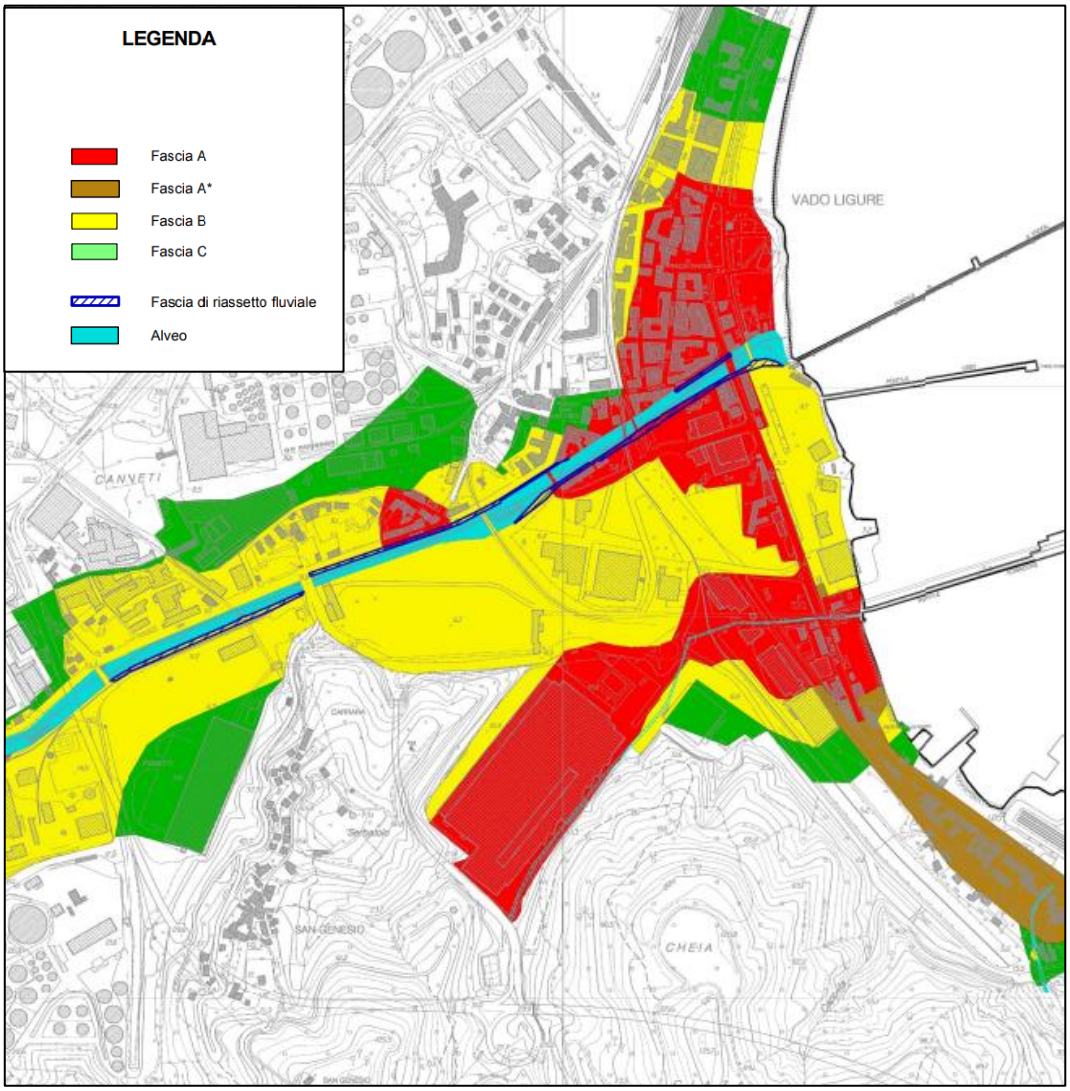


Figura 3: estratto carta delle fasce di inondabilità PdB.

4 INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA

Gli interventi di sistemazione idraulica previsti sono quelli individuati nel progetto preliminare del 2014 con alcune lievi variazioni, relative in particolare all'allineamento dell'argine in sponda destra e alla ricalibratura delle distanze progressive, dovute principalmente agli approfondimenti delle indagini sui manufatti esistenti (muri d'argine, edifici argine) a alle analisi di maggior dettaglio effettuate nell'ambito della progettazione definitiva.

Le verifiche idrauliche effettuate, riportate nel seguito, mostrano come il profilo risultante nella nuova configurazione di progetto risulti del tutto simile a quello del progetto preliminare sia in termini di altezze del pelo libero che di velocità e tensioni tangenziali al fondo.

Con riferimento agli elaborati di progetto (numero delle sezioni e progressive), di seguito si riporta la descrizione degli interventi di sistemazione previsti suddivisi in:

- Sistemazione complessiva
- Interventi previsti nel presente progetto definitivo

4.1 SISTEMAZIONE COMPLESSIVA

Gli interventi di sistemazione complessivi consistono da valle verso monte in:

- allargamento e sistemazione con sezioni rettangolari di larghezza variabile da 28.4 m a 30.4 m dalla sez. 18 (progressiva 441 m a partire dalla foce verso monte) alla sez. 7 (progressiva 99 m) e progressivo allargamento nel tratto a valle sino ai 56 m circa della sez. 1 (progressiva 0.0 m);
- regolarizzazione del fondo con pendenza 0.8% con asportazione materiale in eccesso dalla sez. 19 (progressiva 464, quota 2.90 m s.l.m.) allo sbocco a mare (progressiva 0 m, quota -0.81 m s.l.m.);
- demolizione passerella portatubi (tra sez. 3 e 4) ed ex ponte ferroviario (tra sez. 12 e 13);
- rifacimento passerella pedonale di valle (sez. 4.11, progressiva 51 m) con sezione a campata unica su una larghezza di 40 m e quota minima di intradosso di 3.0 m s.l.m. che consente di mantenere le quote attuali senza necessità di innalzamento;
- rifacimento ponte dell'Aurelia (sez. 6.11 progressiva 85 m) con sezione a campata unica su una larghezza minima di 31.3 m e quota minima di intradosso di 3.83 m;
- realizzazione di soglia a quota 0.0 m s.l.m. immediatamente a monte dell'attraversamento del ponte dell'Aurelia (sez. 7, progressiva 98 m circa).
- demolizione della soletta a sbalzo in sponda sinistra a monte del ponte dell'Aurelia tra sez. 7 (progressiva 102 m) e sez. 9 (progressiva 180 m);
- rifacimento ponte di Via Palestro (sez. 12.11 progressiva 276 m) con sezione a campata unica su una larghezza minima di 30.15 m e quota di intradosso di 5.7 m s.l.m., che comporta un innalzamento dell'estradosso di 1.5 m rispetto alle quote attuali;

- rifacimento ponte di Via alla Costa (sez. 17.11, progressiva 435 m) con sezione a campata unica su una larghezza minima di 29 m e quota minima di intradosso di 6.70 m s.l.m.;
- realizzazione di una vasca di sedimentazione a valle del passante ferroviario, tra le sez. 19 e 22 (L=90 m circa) con larghezza al fondo variabile tra 28 m e 39 m e profondità di circa 1 m rispetto al fondo attuale, compresa tra due briglie nelle sezioni 19 e 21;
- realizzazione di una briglia di altezza pari a 0.5 m (da quota 3.62 m s.l.m. a quota 4.12 m s.l.m.) alla sez. 24.02 (progressiva 579 m s.l.m.);
- demolizione della soletta a sbalzo in sponda sinistra nel tratto compreso tra la sezione più stretta a monte del passante ferroviario (sez. 25, progressiva 628 m) e il ponte Molo 8.4 (sez. 40.1, progressiva 862 m);

In corrispondenza del passante ferroviario (tra le sezioni 21.1 e 24.1) è previsto un tratto plateato con massi naturali cementati, a maggior pendenza rispetto ai tratti di monte e di valle per favorire da una parte il deposito dei materiali all'interno della vasca e dall'altre migliorare il deflusso attraverso il ponte stesso.

La conformazione geometrica di quest'ultimo tratto è condizionata dal confinamento di un area di bonifica che limita la profondità di scavo e di movimento terra in particolare lungo la sponda destra a partire dal passante ferroviario verso monte.

4.2 PROGETTO DEFINITIVO

Il presente progetto definitivo prevede la realizzazione degli interventi sopra elencati, ad eccezione della passerella pedonale di valle (sez. 4.11) che è oggetto di una progettazione separata e che verrà realizzata contestualmente al progetto di sistemazione idraulica, del nuovo ponte della ss. n. 1 Aurelia (sez. 6.11) che verrà realizzato da ANAS in tempi successivi, del rifacimento del ponte di via Palestro (sez. 12.11) nel frattempo già realizzato da parte del Comune di Vado Ligure, e del nuovo ponte di via alla Costa (sez. 17.11) che verrà realizzato dal comune di Vado Ligure.

Il progetto prevede quindi la demolizione della passerella porta-tubi e la contestuale realizzazione della passerella pedonale a valle dell'Aurelia (sez. 4.11), la realizzazione dei nuovi muri d'argine su entrambe le sponde sui nuovi allineamenti con la contestuale demolizione dei tratti a sbalzo in sponda sinistra tra le sezioni 7 e 9 e tra le sezioni 25 e 40.1, la sottomurazione di quelli esistenti in sponda sinistra con la contestuale sistemazione del fondo alveo.

Tra le sezioni 19 e 22 verrà inoltre realizzata la vasca di sedimentazione, della capacità di circa 3000 m^3, come previsto nel progetto preliminare. In corrispondenza della vasca, lungo l'argine in sponda destra, è prevista la realizzazione di una pista di accesso in alveo per le operazioni di pulizia e manutenzione.

Subito a monte e a valle dei ponti dell'Aurelia e di Via alla Costa verranno realizzati degli opportuni raccordi su entrambe le sponde tra i nuovi argini e le spalle degli attuali manufatti.

5 VERIFICHE IDRAULICHE

5.1 PORTATE DI RIFERIMENTO

Le portate di riferimento sono quelle riportate nel Piano di bacino per il torrente Segno alla foce e precisamente:

T= 50 anni	Q=220 m^3/s
T=200 anni	Q=320 m^3/s
T=500 anni	Q=380 m^3/s

5.2 METODOLOGIA DI CALCOLO

Le verifiche idrauliche sono state eseguite mediante l'ausilio di un *software*[6] per il calcolo dell'andamento dei profili di rigurgito in moto permanente gradualmente variato in alvei naturali o canali artificiali che consente anche la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali ecc.

La metodologia di calcolo è riportata in Appendice 1.

5.3 CONFIGURAZIONI DI VERIFICA E PARAMETRI DI CALCOLO

La verifica idraulica è stata effettuata per le seguenti configurazioni:

Configurazione A1

E' una configurazione "intermedia", corrispondente al caso di avvenuta realizzazione delle opere del progetto definitivo, compresi la passerella pedonale di valle e il ponte di Via Palestro, il mantenimento degli attuali ponti dell'Aurelia e di Via alla Costa e nell'ipotesi di vasca di sedimentazione vuota.

Configurazione A2

E' analoga alla Configurazione A1 nell'ipotesi di vasca di sedimentazione piena.

Configurazione B1

Corrisponde al caso di sistemazione finale con il rifacimento dei ponti della Via Aurelia e di Via alla Costa, nell'ipotesi di vasca di sedimentazione vuota.

Configurazione B2

E' analoga alla Configurazione B1 nell'ipotesi di vasca di sedimentazione piena.

6 HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center – US Army Corps of Engineers

Il calcolo è stato effettuato con le portate 50-ennale e 200-ennale per il tratto d'alveo interessato dal presente progetto definitivo compreso tra la foce e il ponte Molo 8.44, per una lunghezza di circa 850 m.

L'intero tratto è caratterizzato da un andamento rettilineo, senza apprezzabili curvature o cambi di direzione.

Ai fini del calcolo è stato utilizzato un valore del coefficiente di scabrezza *n* di Manning pari a 0.03 (33 di Strickler) corrispondente a tratti di corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo, in accordo con quanto indicato con la vigente normativa.

Nel solo tratto plateato e a maggior pendenza a cavallo del passante ferroviario, (tra sez. 24 e sez. 21) è stato adottato un coefficiente *n* di Manning pari a 0.025 (40 di Strickler) corrispondente a tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato.

La verifica è stata eseguita integrando il profilo nelle due condizioni di corrente lenta da valle verso monte e di corrente veloce da monte verso valle (corrente mista), imponendo come condizioni al contorno la profondità di moto uniforme nella sezione di estremità a monte e il livello di 1 m s.l.m. nella sezione di estremità a valle, per tener conto del livello massimo di marea e dell'innalzamento dovuto al moto ondoso, in analogia con le verifiche idrauliche effettuate nel progetto preliminare.

Ai fini di una più completa analisi di sensitività delle verifiche idrauliche, sono stati infine messi a confronto i risultati derivanti dall'integrazione dei profili di rigurgito nel caso di corrente mista con il caso di sola corrente lenta, più sfavorevole in termini di altezze del pelo libero.

Il calcolo è stato effettuato nell'ipotesi di sponde infinite qualora il livello di piena superasse le quote di sommità arginali.

Lungo l'intero tratto sono state individuate una serie di sezioni trasversali in funzione delle caratteristiche geometriche e morfologiche dell'alveo (larghezza, pendenza, curve, presenza di manufatti ecc.), numerate da valle verso monte.

5.4 RISULTATI

I risultati delle verifiche sono riportati in forma numerica e grafica in Allegato A. Di seguito si riportano i risultati per ciascuna configurazione esaminata.

5.4.1 Configurazione Intermedia - vasca vuota (A1)

Il deflusso della portata 200-ennale è condizionato dal restringimento del ponte dell'Aurelia, che genera un rigurgito in corrente lenta verso monte, con quote del pelo libero prossime a 4.2 m s.l.m. Gli effetti del rigurgito si esauriscono circa 300 m a monte, tra il ponte di Via

Palestro e il ponte di Via alla Costa. In tale tratto la profondità media di deflusso varia da valle verso monte tra 4.0 m e 2.9 m con velocità comprese tra 3.0 m/s e 4.0 m/s; il numero di Froude è compreso tra 0.4 e 0.8. Il pelo libero risulta per un breve tratto tra il ponte della Via Aurelia e il ponte di Via Palestro superiore alle quote di sommità arginali in particolare lungo la sponda destra.

Il ponte esistente di Via alla Costa costituisce una sezione di controllo con transizione attraverso lo stato critico e rigurgito in corrente lenta verso monte, con profondità intorno a 3.4 m e velocità variabili da 3.3 m/s a 3.6 m/s circa.

Il deflusso attraverso la vasca vuota avviene in corrente lenta con numero di Froude intorno a 0.3, profondità pari a 4.4 m circa (quota 6.7 m s.l.m. circa), velocità 2.5 m/s circa. La corrente si mantiene lenta sino a monte del passante ferroviario, dove si salda alla corrente veloce in arrivo da monte. Nel successivo tratto a monte la profondità media di deflusso varia 2.5 m e 3.6 m con velocità comprese tra 3.0 m/s e 5.0 m/s; il numero di Froude è compreso tra 0.5 e 1.0.

Da un punto di vista generale il deflusso della portata 200-ennale risulta contenuto all'interno degli argini per la maggior parte del tratto, ad eccezione di un breve tratto a monte del ponte dell'Aurelia il cui rigurgito provoca esondazione sul piano viabile e in particolare lungo la sponda destra. Nel tratto a monte del ponte di Via Palestro il franco rispetto alla sommità degli argini varia da un minimo di 0.56 m ad un massimo di 3.39 m circa in sponda destra (media 1.55 m) e da un minimo di 0.37 m ad un massimo di 3.65 m circa in sponda sinistra (media 1.46 m), con il carico totale quasi ovunque contenuto.

Il deflusso della portata 50-ennale presenta lo stesso andamento del profilo della portata 200-ennale con altezze del pelo libero inferiori rispetto a quelle della 200-ennale di circa 0.80 m. Esso risulta contenuto all'interno degli argini lungo tutto il tratto senza esondazioni.
Il franco rispetto alla sommità degli argini lungo tutto il tratto varia da un minimo di 1.41 m ad un massimo di 3.82 m circa in sponda destra (media 2.27 m) e da un minimo di 1.15 m ad un massimo di 4.04 m circa in sponda sinistra (media 2.18 m), con il carico totale ovunque contenuto.

Deflusso attraverso i ponti

L'esame di risultati mostra come il franco minimo rispetto agli intradossi dei manufatti risulti superiore a 1.5 m (con il carico inferiore all'intradosso) per la nuova passerella pedonale (sez. 4.11) e per il ponte di Via Palestro (sez. 12.11).

Il ponte attuale dell'Aurelia è critico per entrambe le portate, con franco di 0.84 m rispetto alla sommità degli archi per la portata 50-ennale e di 0.45 m per la portata 200-ennale.

Il ponte esistente di Via alla Costa ha un franco superiore a 0.7 m circa rispetto alla quota minima di intradosso per la portata 50-ennale e di 0.2 m circa rispetto alla portata 200-ennale.

Infine il ponte del passante ferroviario esistente ha un franco rispetto all'intradosso pari a 1..08 m rispetto alla portata 50-ennale (con carico contenuto), e 0.3 m (con carico interferente) per la portata 200-ennale, a causa del rigurgito del ponte di via alla Costa.

Nella tabella seguente sono riportati per le portate 50-ennale e 200-ennale e per ciascun manufatto di attraversamento, i principali parametri di calcolo, con particolare riferimento ai franchi risultanti tra l'intradosso e la quota del pelo libero e del carico totale per il caso A1 (vasca vuota) e integrazione in corrente mista.

Sez.			Q50	Q200
4.11	**Nuova Passerella pedonale**	Quota fondo	-0.39	-0.39
		Quota intradosso minima (*)	3.00	3.00
		Quota pelo libero	0.70	0.91
		Quota carico totale	2.05	2.92
		Franco pelo libero/intradosso	2.3	2.09
		Franco carico totale/intradosso	0.95	0.08
6.11	**Ponte Aurelia**	Quota fondo	-0.04	-0.04
		Quota intradosso (sommità arco)	2.80	2.80
		Quota pelo libero	1.96	2.35
		Quota carico totale	3.04	4.06
		Franco pelo libero/intradosso	0.84	0.45
		Franco carico totale/intradosso	-0.24	-1.26
12.11	**Nuovo Ponte Via Palestro**	Quota fondo	1.45	1.45
		Quota intradosso	5.71	5.71
		Quota pelo libero	3.28	4.24
		Quota carico totale	4.14	5.02
		Franco pelo libero/intradosso	2.43	1.47
		Franco carico totale/intradosso	1.57	0.69
17.11	**Ponte Via alla Costa**	Quota fondo	2.69	2.69
		Quota intradosso	5.56	5.56
		Quota pelo libero	4.82	5.39
		Quota carico totale	5.83	6.69
		Franco pelo libero/intradosso	0.74	0.17
		Franco carico totale/intradosso	-0.27	-1.13
22.11	**Passante ferroviario**	Quota fondo	3.79	3.79
		Quota intradosso	6.86	6.86
		Quota pelo libero	5.78	6.55
		Quota carico totale	6.22	7.09
		Franco pelo libero/intradosso	1.08	0.22
		Franco carico totale/intradosso	0.64	-0.23

(*) Quota minima intradosso = pelo libero + 1.5 m o, se maggiore, $U^2/2g$,

Tabella III

5.4.2 Configurazione Intermedia - vasca piena (A2)

Le differenze riguardano solo il tratto della vasca (tra sez. 19 e sez. 21).
La vasca piena ha un effetto benefico sul deflusso con un abbassamento del pelo libero in tale tratto di circa 0.2 m per entrambi i valori di portata con relativo aumento delle velocità di deflusso. I franchi rispetto alla sommità degli argini è superiore a 2 m per la portata 50-ennale e a 1 m per la portata 200-ennale, con il carico contenuto.

5.4.3 Configurazione Finale - vasca vuota (B1)

Il deflusso della portata 200-ennale è interamente contenuto all'interno dell'alveo con franchi superiori a 1 m rispetto agli argini e carico totale contenuto. Il deflusso avviene prevalentemente in corrente lenta con alcuni brevi tratti di corrente veloce in particolare a valle dell'Aurelia e della briglia a monte del passante ferroviario.

Nel tratto a valle del ponte Aurelia la corrente risulta veloce per effetto dell'allargamento dell'alveo, con numero di Froude variabile da 1 a 1.5, altezze comprese tra 2.1 m e 1.3 m circa e velocità variabili tra 4.5 m/s e 5.4 m/s. Nel tratto compreso tra il ponte di Via alla Costa (sez. 17) e il ponte dell'Aurelia (sez. 6.2) il deflusso è prossimo allo stato critico, con altezze comprese tra 2.0 m e 2.5 m circa e velocità intorno a 4.7 m/s.

La vasca vuota genera un rigurgito in corrente lenta (Fr=0.4) con altezza intorno a 4.0 m (quota 6.3 m s.l.m.) e velocità di 2.4 m/s circa. La corrente si mantiene lenta sino alla briglia a monte del passante ferroviario, che costituisce una disconnessione idraulica tra i tratti di monte e di valle. Nel tratto a monte della briglia la profondità media di deflusso varia 2.6 m e 3.6 m con velocità comprese tra 3.0 m/s e 5.0 m/s; il numero di Froude è compreso tra 0.5 e 2.0.

Il franco rispetto alla sommità degli argini lungo tutto il tratto varia da un minimo di 1.00 m ad un massimo di 3.38 m circa in sponda destra (media 2.14 m) e da un minimo di 0.94 m ad un massimo di 5.70 m circa in sponda sinistra (media 2.19 m), con il carico totale ovunque contenuto.

Il deflusso della portata 50-ennale presenta lo stesso andamento del profilo della portata 200-ennale con altezze del pelo libero inferiori rispetto a quelle della 200-ennale di circa 0.60 m. Esso risulta contenuto all'interno degli argini lungo tutto il tratto senza esondazioni.

Il franco rispetto alla sommità degli argini lungo tutto il tratto varia da un minimo di 1.65 m ad un massimo di 3.9 m circa in sponda destra (media 2.68 m) e da un minimo di 1.60 m ad un massimo di 4.40 m circa in sponda sinistra (media 2.60 m), con il carico totale ovunque contenuto.

Deflusso attraverso i ponti

L'esame di risultati mostra come in corrente mista il franco minimo rispetto agli intradossi di tutti i manufatti per la portata 200-ennale risulti sempre superiore a 1.5 m, con il carico

sempre inferiore all'intradosso, ad eccezione del passante ferroviario, per il quale il carico interferisce con l'intradosso (ma con franco rispetto al pelo libero pari a circa 1.7m.

Nella tabella seguente sono riportati per le portate 50-ennale e 200-ennale e per ciascun manufatto di attraversamento, i principali parametri di calcolo, con particolare riferimento ai franchi risultanti tra l'intradosso e la quota del pelo libero e del carico totale per il caso B1 (vasca vuota) e integrazione in corrente mista.

Sez.			**Q50 Mista**	**Q200 Mista**
4.11	**Nuova Passerella pedonale**	Quota fondo	-0.39	-0.39
		Quota intradosso	3.00	3.00
		Quota pelo libero	0.83	1.15
		Quota carico totale	1.92	2.46
		Franco pelo libero/intradosso	2.17	1.85
		Franco carico totale/intradosso	1.08	0.54
6.11	**Nuovo Ponte Aurelia**	Quota fondo	-0.04	-0.04
		Quota intradosso minima **(*)**	3.83	3.83
		Quota pelo libero	1.81	2.33
		Quota carico totale	2.54	3.27
		Franco pelo libero/intradosso	2.02	1.50
		Franco carico totale/intradosso	1.29	0.56
12.11	**Nuovo Ponte Via Palestro**	Quota fondo	1.45	1.45
		Quota intradosso	5.71	5.71
		Quota pelo libero	3.30	3.82
		Quota carico totale	4.14	4.90
		Franco pelo libero/intradosso	2.41	1.89
		Franco carico totale/intradosso	1.57	0.81
17.11	**Nuovo Ponte Via alla Costa**	Quota fondo	2.69	2.69
		Quota intradosso minima **(*)**	6.70	6.70
		Quota pelo libero	4.62	5.20
		Quota carico totale	5.46	6.23
		Franco pelo libero/intradosso	2.08	1.50
		Franco carico totale/intradosso	1.24	0.47
22.11	**Passante ferroviario**	Quota fondo	3.79	3.79
		Quota intradosso	6.86	6.86
		Quota pelo libero	4.90	5.17
		Quota carico totale	6.33	7.13
		Franco pelo libero/intradosso	1.96	1.69
		Franco carico totale/intradosso	0.53	-0.27

(*) Quota minima intradosso = pelo libero + 1.5 m o, se maggiore, $U^2/2g$

Tabella IV

5.4.4 Configurazione Finale - vasca piena (B2)

Le differenze riguardano solo il tratto della vasca (tra sez. 19 e sez. 21).
La vasca piena ha un effetto benefico sul deflusso con un abbassamento del pelo libero in tale tratto di 0.3 m circa per la portata 200-ennale e 0.2 m circa per la portata 50-ennale con relativo aumento delle velocità di deflusso.
I franchi rispetto alla sommità degli argini è superiore a 2 m per la portata 50-ennale e a 1 m per la portata 200-ennale, con il carico contenuto.

5.4.5 Confronti con il comportamento idraulico in corrente lenta

Ai fini di una più completa analisi di sensitività delle verifiche idrauliche, è stata inoltre effettuata l'integrazione dei profili di rigurgito per la sola corrente lenta, che rappresenta il caso più sfavorevole in termini di altezza del pelo libero rispetto alla corrente mista.

A1
L'integrazione per la sola corrente lenta conduce a valori del pelo libero mediamente superiori di 0.2 m circa per la portata 200-ennale e di 0.17 m per quella 50-ennale.
Rimane quindi critico l'attraversamento del ponte dell'Aurelia con esondazione nel tratto a monte per la portata 200-ennale.
Si riducono, anche se di poco, i franchi rispetto alla sommità degli argini e all'intradosso dei manufatti di attraversamento.

A2
Simile alla configurazione A1. Le differenze tra integrazione in corrente mista e quella in corrente lenta sono contenute mediamente in circa 0.2 m per entrambi i valori di portata con differenze maggiori nel tratto a valle dell'Aurelia e tra il ponte di Via Palestro e quello di Via alla Costa.

B1
L'integrazione per la sola corrente lenta conduce a valori del pelo libero mediamente superiori di pochi centimetri (0.1 circa) per entrambe le portate. Le differenze maggiori si riscontrano localmente nell'attraversamento del passante ferroviario, con una riduzione del franco rispetto all'intradosso ma con il carico comunque sempre contenuto.

B2
I risultati sono del tutto simili a quelli del caso B1. Anche in questo caso le differenze maggiori si riscontrano localmente nell'attraversamento del passante ferroviario, con una riduzione del franco rispetto all'intradosso.

Attraversamento dei ponti
Per la configurazione di corrente lenta (a favore di sicurezza) il franco risulta nella maggior parte dei casi superiore a 1.5 per la portata 50-ennale e 1.0 m per la portata 200-ennale; per il solo passante ferroviario il franco in tali condizioni si riduce a circa 1.4 m per la portata 50-ennale e a 0.8 m circa per la portata 200-ennale, ma con carico contenuto

ALLEGATO A

VERIFICHE IDRAULICHE

APPENDICE 1

SOFTWARE DI CALCOLO HEC-RAS 5.0.7

Il software di calcolo *Hec-Ras 4.1* della US Army Corps of Engineers consente il calcolo dell'andamento dei profili di rigurgito in moto permanente gradualmente variato in alvei naturali o canali artificiali e la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali ecc.,

La determinazione del profilo teorico è ottenuta tramite l'applicazione del cosiddetto *Standard step method* che si basa sulla semplice equazione mono-dimensionale del contenuto energetico della corrente:

$$H_1 - H_2 = h_f + h_e$$

dove $H_1[m]$ ed $H_2[m]$ sono i carichi totali della corrente nelle sezioni di monte e di valle del tronco d'alveo considerato, $h_f[m]$ sono le perdite di carico dovute all'attrito del fondo e delle sponde, mentre $h_e[m]$ è un termine che tiene conto degli effetti dovuti alla non cilindricità della corrente.

In particolare h_f dipende principalmente dalla scabrezza del tratto d'alveo considerato ed è esprimibile come:

$$h_f = j_f \cdot L$$

con j_f pendenza motrice nel tratto di lunghezza $L[m]$.

Il calcolo di j_f è effettuabile con diverse formulazioni, in funzione della pendenza motrice J in corrispondenza delle sezioni d'inizio e fine di ciascun tratto.

Il calcolo del termine J nella singola sezione è effettuato mediante la:

$$J = \left[\frac{Q}{K}\right]^2$$

dove $Q[m^3/s]$ è la portata di calcolo e K (denominato *conveyance*) è ricavabile attraverso la seguente espressione:

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

dove $A[m^2]$ l'area della sezione liquida, $R[m]$ il raggio idraulico e $n[m^{-1/3}\ s]$ è il parametro rappresentativo della scabrezza del fondo e delle sponde di Manning.

Il valore del coefficiente n è determinato secondo la procedura sviluppata da Cowan selezionando le caratteristiche più rilevanti ai fini della quantificazione dell'indice di resistenza.

Il termine h_e dipende invece dalla variazione del carico cinetico della corrente tra le sezioni 1 e 2 dovuta al cambio di geometria delle sezioni stesse ed è a sua volta esprimibile come:

$$h_e = \beta \cdot \left| \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} - \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right|$$

dove β è un coefficiente di contrazione o espansione dipendente dalle condizioni geometriche del tratto considerato, V_1 e V_2 $[m/s]$ sono i valori delle velocità medie agli estremi del tronco e α_1 e α_2 sono i coefficienti correttivi dell'energia cinetica.

Il modello consente di suddividere la sezione in più zone in cui assegnare un valore diverso del parametro *n* di scabrezza; in particolare è possibile individuare tre zone principali: quella centrale dell'alveo inciso (denominata *main channel*) e due zone laterali golenali (denominate *right and left overbanks*).

Il programma consente la simulazione del deflusso attraverso ponti e tombinature (*bridge* and *culvert*) mediante la loro schematizzazione geometrica (impalcato, pile, setti, ecc.).

La procedura di calcolo utilizzata consente di simulare il deflusso a pelo libero al di sotto dell'impalcato, il deflusso in pressione al di sotto dell'impalcato e la combinazione del deflusso in pressione e del deflusso con scavalcamento dell'impalcato stesso (funzionamento a stramazzo).

Per il deflusso a pelo libero il modello consente la scelta fra diversi metodi di calcolo quali il metodo del bilancio energetico (*Standard step method*), il metodo dei momenti (*Momentum Balance*), la formula di Yarnell per correnti lente.

Il funzionamento in pressione è simulato mediante la formulazione propria dell'efflusso da luce:

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$

dove $Q[m^3/s]$ è la portata defluita attraverso la luce di area $A[m^2]$, $H[m]$ è il dislivello tra il carico totale di monte ed il pelo libero a valle e C è il cosiddetto coefficiente di efflusso.

Il programma prevede la messa in pressione della struttura quando, secondo la scelta dell'utente, il carico totale o la quota del pelo libero risultano superiori alla quota dell'intradosso dell'impalcato.

Il funzionamento a stramazzo è simulato attraverso la formulazione standard:

$$Q = C \cdot L \cdot H^{\frac{3}{2}}$$

dove $Q[m^3/s]$ è la portata defluita sulla soglia di larghezza $L[m]$ e $H[m]$ è il dislivello tra il carico totale di monte e la quota della soglia e C è il coefficiente di efflusso, variabile in funzione del tipo di stramazzo e del carico sopra la soglia.

Nel caso di funzionamento combinato di moto in pressione con scavalcamento del ponte (stramazzo) l'entità delle portate stramazzanti e defluenti al di sotto dell'impalcato viene determinata attraverso una procedura iterativa combinando le equazioni che regolano i due fenomeni.

Il modello consente inoltre il calcolo del funzionamento in pressione di coperture, scatolari, tombinature e della portata esondata lungo le sponde nei tratti a cielo aperto quando il livello superi le quote di sommità arginale (*lateral structure*).

Nel rispetto dell'equazione di continuità il programma fornisce in quest'ultimo caso per ciascuna configurazione di portata imposta da monte l'entità delle portate esondate per ciascuno stramazzo laterale e la portata residua di valle, con i rispettivi livelli.