COMUNE DI FINALE LIGURE
PROVINCIA DI SAVONA

FINALMARE S.p.a.

MESSA IN SICUREZZA DEL TORRENTE PORA
INTERVENTI DI SISTEMAZIONE IDRAULICA - 1°STRALCIO
TRA IL PONTE DI VIA SAGITTARIO E LA FOCE

PROGETTO PRELIMINARE



1.2 RELAZIONE TECNICA

COMMESSA: 1310601

REVISIONE				CONTROLLO	NOTE
n°	MODIFICA	DATA	TECNICO		
0	PER EMISSIONE	Aprile 2013	E.F.	A.G.	
1	PER INTEGRAZIONI	Aprile 2014	E.F.	A.G.	
2	PER REVISIONE	Aprile 2017	C.P.	A.G.	
3	PER REVISIONE	Giugno 2017	C.P.	A.G.	

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI PADOVA
ING. ALBERTO GALLI N. 2379

ORDINE DEGLI INGEGNERI REGGIO EMILIA
DOTT. ING. CERLINI DENIS n. 972

PROGETTISTI:

SGI Studio Galli Ingegneria SPA
Via della Provvidenza, 13 35030 Sarmeola di Rubano (PD)
tel. +39 049 8976844 - fax +39 049 8976784
Website:http:/www.sgi-spa.it; Mail: info@sgi-spa.it

STUDIO MAIONE INGEGNERI ASSOCIATI
Via Inama, 7 - 20133 Milano - tel. +39.02.70120918 fax +39.02.70120923
Via Cavallotti, 16 - 43100 Parma - tel. +39.0521.508419 fax +39.0521.221022

INDICE

1. PREMESSA 3
2. DATI DI BASE UTILIZZATI 5
2.1. Quadro normativo di riferimento 5
2.2. Inquadramento geomorfologico 5
2.3. Rilievi topografici e caratterizzazione granulometrica del materiale d'alveo 6
3. SCHEMI DI CALCOLO UTILIZZATI PER L'ANALISI IDRAULICA 9
3.1. Modello monodimensionale 9
3.1.1. Funzionamento idraulico dei manufatti 11
3.1.2. Sezioni di calcolo e scabrezze 13
3.1.3. Condizioni al contorno 16
3.2. Modello idraulico bidimensionale 17
3.2.1. Struttura generale del codice di calcolo 17
3.2.2. Modulo idrodinamico 19
3.2.3. Modulo a fondo mobile 20
3.2.4. Costruzione del modello e condizioni al contorno 21
4. VERIFICA IDRAULICA DELLO STATO DI FATTO 25
5. VERIFICA IDRAULICA DELLA SOLUZIONE PROGETTUALE 26
5.1. Criteri progettuali adottati 26
5.2. Descrizione dell'alveo nello stato di progetto 26
5.3. Analisi in moto monodimensionale 27
5.4. Analisi in moto bididimensionale 31
6. VERIFICA IDRAULICA DELLA CONFIGURAZIONE DI 1 STRALCIO 36
6.1. Evento con tempo di ritorno di 50 anni 36
6.2. Evento con tempo di ritorno di 200 anni 38
6.3. Evento con tempo di ritorno di 500 anni 40
7. VALUTAZIONI DELLE TENDENZE EVOLUTIVE DELL'ALVEO 42
7.1. Metodologia adottata 42
7.2. Applicazione al tronco terminale del Pora 45
7.3. Analisi in moto bidimensionale a fondo mobile - configurazione di 1 stralcio 46
8. INDIRIZZI PER LA MANUTENZIONE DELL'ALVEO E DELLE OPERE DI DIFESA 51
8.1.1. Manutenzione dell'alveo 51
8.1.2. Opere di difesa idraulica 52
9. ALLEGATO A: STATO DI PROGETTO - SEZIONI TRASVERSALI 56

1. PREMESSA

La presente relazione tratta gli aspetti idrologici ed idraulici connessi con la progettazione preliminare degli interventi prioritari per la messa in sicurezza del Torrente Pora nel tratto compreso tra il ponte di via Sagittario e la foce.

La presente fase di progettazione preliminare ricalca per la maggior parte quanto già definito nell'ambito del progetto preliminare redatto nell'anno 2003 e successivamente aggiornato all'anno 2005 tenendo conto che l'intervento di riconversione delle aree Piaggio avrebbe consentito interventi di ampliamento dell'alveo del Pora in sponda destra e di mantenimento dell'attuale ponte FF.SS., realizzando in alternativa un nuovo fornice (luce idraulica integrativa) sul rilevato FF.SS. sempre a scapito della sponda destra. Sulla base del progetto preliminare aggiornato all'anno 2005, la Provincia di Savona procedette al recepimento del quadro degli interventi da esso definito nel Piano Interventi e nella Carta della Fascia di Riassetto del Piano di Bacino del Torrente Pora (C.T.P. n. 84 del 27.04.06).

Nell'anno 2012, la società Piaggio Aero Industries S.p.a. ha presentato agli Enti competenti, in sede di Conferenza di servizi preliminare, una proposta di variante all'Accordo di programma per la riconversione delle aree Piaggio. Tale proposta di variante è basata su di un Piano Urbanistico che considera, unitamente agli altri interventi infrastrutturali, il completo rifacimento oltre che del ponte della strada Aurelia anche del ponte ferroviario sulla linea Genova-Ventimiglia.

Il soggetto attuatore dell'accordo, la società Finalmare S.p.a., ha quindi effettuato una ulteriore fase di studio idraulico e morfologico del tratto terminale del T. Pora dalla confluenza con il T. Aquila fino alla foce, finalizzato alla definizione di un nuovo assetto idraulico di progetto tale da consentire la messa in sicurezza dell'area Piaggio in sponda sinistra nell'ambito dell'attuazione del Piano e del territorio in sponda sinistra, unitamente al futuro completamento degli interventi in sponda sinistra nel tratto di monte.

La nuova soluzione progettuale, definita in questa sede a livello preliminare, ricalca per la maggior parte quanto già definito nell'ambito del progetto preliminare redatto nell'anno 2003, fatta eccezione per gli interventi di ampliamento dell'alveo, che vengono ora previsti a scapito della sponda destra del Pora e preservando nello stato di fatto l'assetto planimetrico della sponda sinistra. In particolare nella presente relazione sono riportate le valutazioni ed i calcoli idrologici necessari alla definizione delle

portate di piena per eventi di assegnato tempo di ritorno Tr da considerare nell'analisi dello stato di fatto e nella configurazione di progetto.

Si è quindi studiata la propagazione delle portate al colmo lungo l'asta del torrente Pora, dalla confluenza con il T.Aquila fino alla foce (sez. 37-sez.1), mediante l'utilizzo di un modello matematico monodimensionale e bidimensionale, onde stabilire il comportamento idrodinamico del corso d'acqua nel tratto in esame (1° stralcio compreso tra le sez.23-sez.1), individuarne le principali criticità e verificare la configurazione progettuale contestualmente al futuro completamento degli interventi di sistemazione idraulica lungo il tratto di monte (sez.23-sez.37).

Le valutazioni in merito alle tendenze evolutive del corso d'acqua sono state condotte mediante la metodologia di calcolo proposta dalla FHWA (*Federal Highway Administration*) - *Design of Roadside Channels with Flexible Linings - Hydraulic Engineering Circular Number 15, Third Edition.*

Un'ulteriore approfondimento in merito alle tendenze evolutive del corso d'acqua, in particolare lungo il tratto interessato dalle opere di 1°stralcio (sez.23-sez.1) è stato condotto mediante l'implementazione di un modello bidimensionale a fondo mobile.

2. DATI DI BASE UTILIZZATI

2.1. Quadro normativo di riferimento

Gli scriventi hanno preso visione del piano di bacino stralcio sul rischio idrogeologico predisposto dalla Provincia di Savona in adempimento all'art. 1, comma 1, del decreto-legge 11 giugno 1998, n. 180, convertito, con modificazioni, nella legge 3 agosto 1998 n 267. Esso costituisce parte del Piano di Bacino stralcio per la difesa Idrogeologica, nonché del piano di bacino completo, di cui alla legge 18 maggio 1989, n.183 e sue modificazioni ed integrazioni.

Le verifiche idrauliche nello stato di fatto e nella configurazione di progetto sono state condotte nel rispetto di tutte le prescrizioni indicate nel *Piano di Bacino* di cui sopra, e documentazione ad esso connessa, in particolare per quanto riguarda la portata di piena di progetto, i tempi di ritorno, i parametri di scabrezza ed i franchi di sicurezza idraulica.

Le soluzioni progettuali sono state esaminate anche sulla base di valutazioni di tipo ambientale in funzione delle previsioni effettuate dagli strumenti programmatici e di pianificazione vigenti (*Piano Territoriale Regionale*, *Piano Territoriale di Coordinamento della Costa*, *Piano Urbanistico Comunale*, aree protette, *SIC* e *ZPS*).

Inoltre nell'ambito della presente progettazione preliminare è stata effettuate una ulteriore analisi finalizzata all'individuazione del "rischio archeologico" cui possono essere soggetti gli interventi di sistemazione idraulica. Tali valutazioni sono riportate nello "*Studio storico relativo al tratto di torrente Pora e Aquila nei pressi del centro storico di Finalborgo*" - Maggio 2003 – riportata nella *Relazione di Prefattibilità Ambientale* (*elaborato 1.3*).

2.2. Inquadramento geomorfologico

Il bacino idrografico del Torrente Pora appartiene all'ambito regionale n.10 Pora individuato dall'Autorità di Bacino di Rilievo Regionale ai sensi ex L.R. n.9/1993 ed è situato nel territorio amministrativo dei Comuni di Finale Ligure, Orco Feglino, Rialto e Calice Ligure. La superficie del bacino è di circa 58 Km², di forma triangolare con sbocco sul Mar Ligure completamente compreso nella fascia costiera del Comune di Finale Ligure.

Il Torrente Pora ha le caratteristiche tipiche dei torrenti liguri con foce nel Mar Tirreno: alveo incassato nella parte montana e affluenti laterali con elevate pendenze, diminuzione delle pendenze nei tratti vallivi dove si trovano gli insediamenti civili ed industriali. Si possono facilmente individuare tre tratti con caratteristiche geomorfologiche specifiche ben distinguibili:

- Asta del T. Aquila;
- Asta del T. Pora a monte dell'abitato di Finalborgo;
- Asta terminale del T. Pora a valle dell'abitato di Finalborgo.

Il Torrente Aquila ha un'asta principale che si sviluppa con direzione prevalente Nord-Sud nel settore orientale del bacino idrografico interessando i Comuni di Orco Feglino e Finale Ligure. Le aree urbanizzate iniziano dove il torrente in corrispondenza del centro abitato di Feglino, dopo il quale il corso d'acqua corre parallelamente alla SP n.27 fino, in corrispondenza della località Arma dell'Aquila (Finale Ligure) ove presenta un rilevante salto di quota. Più a valle c'è la confluenza con il Torrente Pora in corrispondenza della quale si trova in destra orografica il centro abitato di Finalborgo.

Il Torrente Pora nasce nel Comune di Rialto a circa 1000 m s.m.m. dalla confluenza del Rio Peccione con il Rio Rivase. Esso riceve due affluenti principali: il Rio Carbuta (6 Km² di bacino), che confluisce nel Pora all'altezza del centro abitato di Calice Ligure, ed il Torrente Aquila (21 Km² di bacino) che confluisce nel Torrente Pora poco a sud dell'abitato di Finalborgo (Finale Ligure). Le aree urbanizzate iniziano in corrispondenza dell'abitato di Calice Ligure, scorre poi verso valle parallelamente alla SP n.17. In sinistra orografica si trova la zona industriale di Finale Ligure (località Perti) e quindi sempre in sponda sinistra l'abitato di Finalborgo fino alla confluenza con il T. Aquila.

L'asta terminale del T. Pora si estende a valle della confluenza tra il tratto montano del Torrente Pora ed il Torrente Aquila in corrispondenza a valle dell'abitato di Finalborgo. Tale tratto è altamente antropizzato con difese costituite da muri in calcestruzzo.

2.3. Rilievi topografici e caratterizzazione granulometrica del materiale d'alveo

Per l'elaborazione del progetto è stato utilizzato un rilievo topografico di dettaglio dell'intera area oggetto dell'intervento di riconversione delle aree Piaggio comprendente sia l'alveo sia l'area in destra Pora.

Al fine di elaborare un quadro generale delle caratteristiche sedimentologiche di fondo alveo del T. Pora, nel presente studio, si fa riferimento al campionamento, di un'idonea quantità di materiale dal letto fluviale, avvenuto in corrispondenza della sezione 25 che, per caratteristiche del materiale, può essere considerata rappresentativa dell'intero corso d'acqua.

In generale si osserva che il materiale che costituisce il fondo alveo è caratterizzato da granulometrie grossolane di tipo ciottoloso - ghiaioso. Per i materiali ghiaiosi e sabbioso-limosi derivanti dal campionamento diretto tramite prelievo, si è proceduto al trasferimento in laboratorio di un volume significativo di materiale, e successivamente si è effettua una setacciatura seguendo i criteri previsti dalle normative UNI-EN 933-1.

Nel caso di campioni grossolani è stata eseguita una selezione preliminare con i setacci 0.5", 1" e 2" precedente all'essiccamento dei campioni senza la possibilità di introduzione di errori significativi in quanto l'umidità eventualmente trattenuta permane nella frazione più minuta. Il peso del campione è superiore a 2 kg mentre per i depositi più grossolani si è fatto riferimento a quanto previsto dai metodi standard ASTM (almeno 4 kg per i campioni con clasti maggiori trattenuti dal setaccio da 2").

Il risultato dell'indagine si esplicita in un certificato delle analisi granulometriche che riporta i dati ricavati in forma tabellare e grafica.

Figura 1:*Analisi granulometrica del campione prelevato lungo il tratto del T. Pora a valle della confluenza con il T. Aquila.*

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI

LABORATORIO TERRE E ROCCE - PROVE IN SITU - GEOFISICA

VIA PIAVE 122/a 17047 VADO LIGURE (SV)

Tel. 019-2100241

SERVIZI GEOTECNICI LIGURI

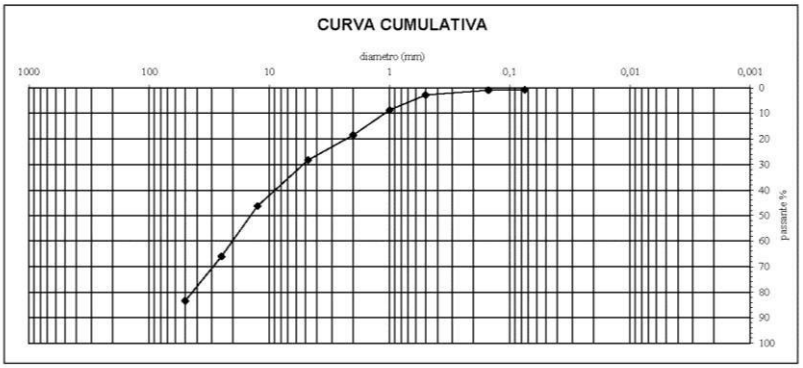
ANALISI GRANULOMETRICA

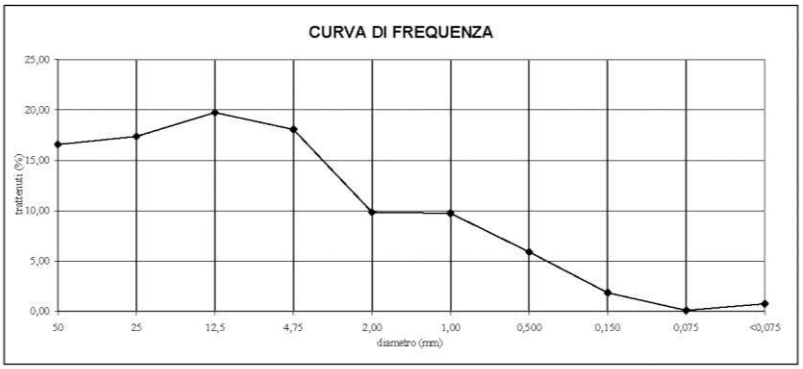
Certificato n° 03/83/03

Committente: TERRA s.r.l.	**Campione: PORA 2**
Lavoro: controllo materiale proveniente dal T. Pora	**Insediamento:**
Località: Finale Ligure (SV)	**Prelievo:**
Data ricevimento: 03/07/03	**Data esecuzione prova: 04/07/03**
Stoccaggio campione:	**Specifica di prova:**
Campionamento: manuale	**Operatore: Dott.ssa C. Delsante**
Note:	

Analisi con setacci **M (gr) = 4304,00**

Setacci	Apertura maglie mm	Apertura maglie ϕ	Peso terreno trattenuto (gr)	Parziale dei trattenuti %	Totale dei trattenuti %	Totale dei passanti %
2 "	**50**	**-5,64**	713,06	16,57	16,57	83,43
1 "	**25**	**-4,64**	748,26	17,39	33,95	66,05
1/2 "	**12,5**	**-3,64**	849,06	19,73	53,68	46,32
4	**4,75**	**-2,25**	777,48	18,06	71,74	28,26
10	**2,00**	**-1,00**	424,50	9,86	81,61	18,39
18	**1,00**	**0,00**	419,10	9,74	91,34	8,66
35	**0,500**	**1,00**	255,08	5,93	97,27	2,73
100	**0,150**	**2,74**	79,74	1,85	99,12	0,88
200	**0,075**	**3,74**	4,86	0,11	99,24	0,76
Fondo	**<0,075**		32,86	0,76		





Parametri caratteristici

D10	D50	D 75	D 84	D 90	D max	
mm	mm	mm	mm	mm	mm	
1,18	**16,5**	**27,5**	-	-	**67**	

3. SCHEMI DI CALCOLO UTILIZZATI PER L'ANALISI IDRAULICA

3.1. Modello monodimensionale

Le verifiche idrauliche del tratto fluviale oggetto del presente studio sono state effettuate in condizioni di moto permanente tramite il modello numerico di simulazione *HEC-RAS - River Analysis System - sviluppato dall'US Army Corps of Engineers (Version 4.1.0, January 2010).*

Il tratto del torrente Pora modellato si estende dalla foce (sez.1) sino alla confluenza con il Torrente Aquila (sez.37) poiché si è inteso valutare non solo l'assetto di progetto del tratto di asta torrentizia oggetto degli interventi di sistemazione idraulica volti a mettere in sicurezza l'area Piaggio, in sponda destra, ma anche l'inquadramento di questo 1° tralcio di interventi di progetto nel contesto più generale del tronco fluviale del T.Pora che si estende verso monte fino alla confluenza con il T.Aquila.

Nella modellazione idraulica realizzata sono stati inseriti i manufatti di attraversamento, descrivendone le caratteristiche tridimensionali sia nell'attuale configurazione relativa allo stato di fatto sia nella configurazione di progetto.

La procedura di calcolo implementata in Hec-Ras è nota in letteratura con il nome di Standard Step Method. Essa consiste nel calcolo della quota del pelo libero in una sezione a partire da quella nota in una sezione adiacente, per mezzo di un procedimento iterativo, basato sulle seguenti due equazioni:

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \qquad (1)$$

$$h_e = L\overline{S_f} + C\left|\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g}\right| \qquad (2)$$

nelle quali:

WS_1, WS_2 = quote del pelo libero nelle sezioni alle estremità della tratta considerata;

V_1, V_2 = velocità media (portata/area liquida) nelle citate sezioni;

α_1, α_2 = coefficiente di Coriolis;

g = accelerazione di gravità (= 9,81 m/s^2);

h_e = perdita di energia tra le 2 sezioni;

L = lunghezza della tratta (media pesata);

S_f = cadente piezometrica della tratta;

C = coefficiente di espansione o contrazione.

La lunghezza media della tratta viene definita come:

$$L = \frac{L_{lob}\overline{Q}_{lob} + L_{ch}\overline{Q}_{ch} + L_{rob}\overline{Q}_{rob}}{\overline{Q}_{lob} + \overline{Q}_{ch} + \overline{Q}_{rob}} \qquad (3)$$

essendo:

L_{lob}, L_{ch}, L_{rob} = lunghezze per il moto in golena sinistra, nell'alveo di magra e in golena destra;

$\overline{Q}_{lob}$, $\overline{Q}_{ch}$, $\overline{Q}_{rob}$ = media aritmetica delle portate nelle due sezioni con riferimento a golena sinistra, alveo di magra e golena destra.

La determinazione della capacità di portata totale e del coefficiente di Coriolis per una data sezione richiede che il flusso sia suddiviso in parti con velocità uniformemente distribuita. In pratica il flusso nelle golene viene suddiviso in base ai punti utilizzati per descrivere la geometria della sezione, e la capacità di portata in ogni posizione dell'area liquida è calcolata con la seguente espressione:

$$k = \frac{1}{n} a r^{2/3} \qquad (4)$$

dove:

k = capacità di portata della porzione considerata;

n = coefficiente di Manning della porzione;

a = area della porzione;

r = raggio idraulico della porzione.

La capacità di portata totale dell'intera sezione è ottenuta come somma delle capacità delle singole porzioni nelle quali la stessa è stata suddivisa.

Le perdite di carico vengono calcolate come prodotto della lunghezza media pesata della tratta L, determinata con l'espressione (3), per la cadente piezometrica media.

Nelle espressioni analitiche utilizzate per il calcolo dei profili di moto sono implicite le seguenti osservazioni, che pertanto devono essere verificate nell'effettivo fenomeno fisico soggetto ad indagine:

(a) il moto è stazionario

(b) il moto è gradualmente vario

(c) il moto è unidimensionale (componenti della velocità in direzioni diverse da quella del moto non sono considerate)

(d) la pendenza del corso d'acqua è "piccola" (<10%).

Si assume il moto stazionario in quanto nelle equazioni utilizzate non compaiono i termini dipendenti dal tempo. Il moto deve essere di tipo gradualmente vario perché l'equazione (1) è basata sull'ipotesi che in tutte le sezioni viga una distribuzione idrostatica delle pressioni.

Il moto deve essere unidimensionale perché l'equazione (4) è basata sull'ipotesi che la quota energetica sia la stessa in tutti i punti di una sezione.

Si assumono poi pendenze "piccole" perché si assume di avere distribuzione idrostatica delle pressioni lungo le verticali, che per valori piccoli della pendenza possono essere identificate con le normali al moto.

Per quanto riguarda l'imposizione delle condizioni al contorno, costituite dalla quota idrometrica nella sezione più a valle nel caso di calcolo di un profilo di corrente lenta ed in quella di monte per corrente rapida, occorre ricercare una sezione di controllo (ad esempio in cui si possa assumere l'altezza critica, come traverse eccetera) oppure calcolare una quota di partenza ad esempio utilizzando la scala delle portate.

3.1.1. Funzionamento idraulico dei manufatti

I principali manufatti che interferiscono con il libero deflusso delle acque lungo il torrente Pora sono costituiti, procedendo da valle verso monte, da:

- ponte della SS Aurelia (tra le sezioni 5 e 4)
- ponte RFI (tra le sezioni 8 e 7)
- ponte di via Sagittario (tra le sezioni 20 e 21)

In HEC-RAS possono essere schematizzate diversi tipi di strutture, sia trasversali al corso d'acqua che parallele allo stesso. Per le strutture trasversali la valutazione delle perdite di carico dovute alla presenza della struttura è fatta mediante la schematizzazione con 4 sezioni del tratto in cui avviene la contrazione e l'espansione della vena liquida, come rappresentato nella figura seguente.

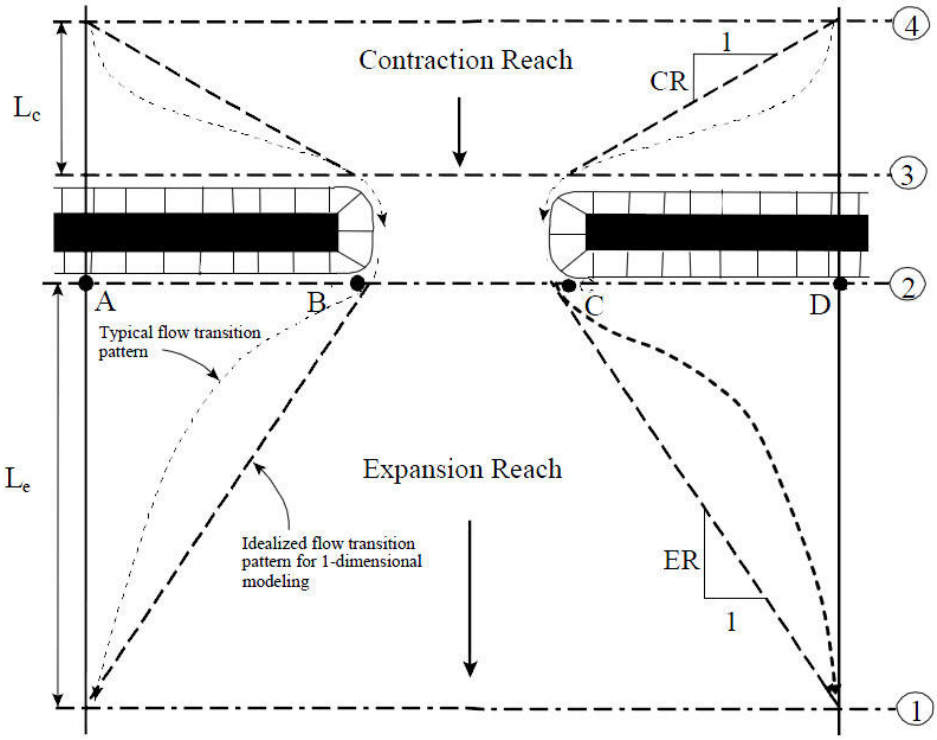


Figura 2: Sezioni di calcolo schematizzate in HEC-Ras per il calcolo del pelo libero in corrispondenza delle strutture trasversali

Per il calcolo dei sovralzi, delle resistenze al moto e dei rigurgiti il codice di calcolo consente di ricercare la soluzione mediante diverse metodologie di calcolo. In particolare, per il deflusso attraverso ponti e tombinature, la procedura di calcolo utilizzata simula 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 codice di calcolo utilizza i seguenti modelli:

- la conservazione dell'energia;
- applicazione della formula empirica di Yarnell, che richiede la stima di un coefficiente *Cd* dipendente dalla forma delle pile in alveo;
- applicazione del teorema della quantità di moto per il volume di controllo compreso tra le sezioni di monte e valle;
- metodo empirico WSPRO.

È possibile inoltre impostare un'opzione per la scelta automatica del metodo che prevede la soluzione che comporta la maggiore perdita energetica.

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

$$Q = CA\sqrt{2gH}$$

dove Q (m³/s) è la portata defluita attraverso la luce di area A (m²), 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

$$Q = CLH^{3/2}$$

dove Q (m³/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.

3.1.2. Sezioni di calcolo e scabrezze

Le sezioni di calcolo impiegate nella modellazione sono quelle restituite dal rilievo topografico di dettaglio eseguito a supporto delle fasi precedenti della presente progettazione (anno 2003), caratterizzate da un interasse pari a ca. 30 m. Le sezioni presentano una larghezza pari a circa 50 m in modo da descrivere con adeguata precisione la geometria dell'alveo e la conformazione del terreno, con l'eventuale presenza di elementi rilevanti, nelle immediate vicinanze dell'alveo al di fuori delle sommità arginali.

L'immagine a seguire riporta l'ubicazione delle sezioni inserite nel modello di calcolo. Per ulteriori approfondimenti in merito si rimanda all'elaborato di progetto 4.1.

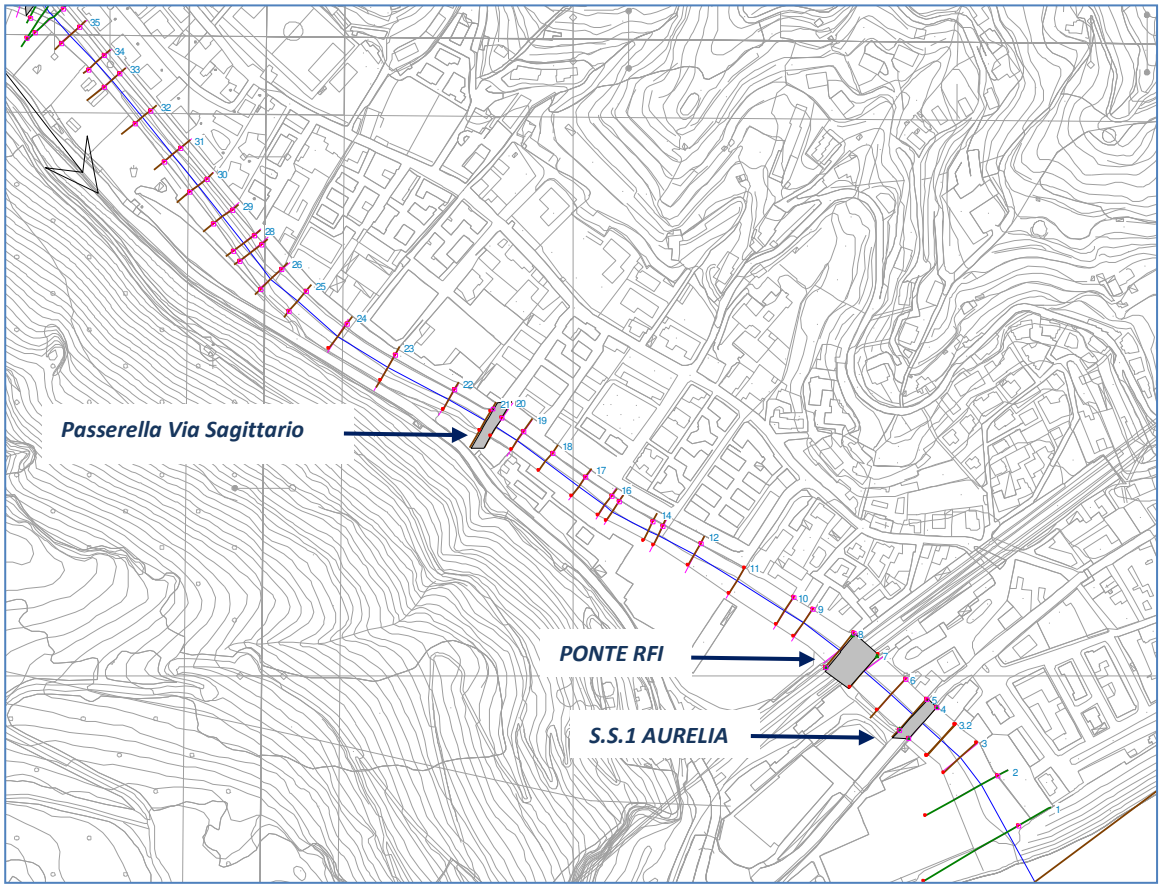


Figura 3: Rappresentazione su carta tecnica regionale del tronco fluviale modellato in HEC – RAS.

Il software di calcolo consente di specificare differenti valori di scabrezza sia in senso longitudinale, sia all'interno delle singole sezioni trasversali, qualora vengano impiegate più tipologie di materiale oppure siano presenti differenti tipi di vegetazione.

Nell'ambito delle simulazioni effettuate, per definire il coefficiente di scabrezza lungo il tratto d'alveo oggetto di modellazione idraulica, è stata applicata la formula di calcolo indicata nella *Direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce "A" e "B" – Norme di attuazione –Piano Stralcio dell'Assetto Idrogeologico (PAI).*

La metodologia proposta fa riferimento alle indicazioni fornite dalle tabelle di "*Open channel hydraulics", Ven Te Chow, McGraw Hill International editions* riportata a seguire:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)\, m_5$$

dove:

n= coefficiente di Manning

n_0= coefficiente che dipende dal materiale costituente l'alveo

n_1= coefficiente che dipende dalle irregolarità della superficie della sezione dell'alveo

n_2= coefficiente che dipende dalla variazione della forma e della dimensione della sezione trasversale

n_3= coefficiente che considera l'effetto relativo delle ostruzioni

n_4= coefficiente che considera l'effetto della vegetazione

m_5= coefficiente che considera il grado di sinuosità dell'alveo.

Condizioni dell'alveo		Valori	
Materiale costituente l'alveo	Terra	n_0	0.020
	Roccia		0.025
	Alluvione grossolana		0.028
	Alluvione fine		0.024
Irregolarità della superficie della sezione	Trascurabile	n_1	0.000
	Bassa		0.005
	Moderata		0.010
	Elevata		0.020
Variazione della forma e della dimensione della sezione trasversale	Graduale	n_2	0.000
	Variazione occasionalmente		0.005
	Variazione frequente		0.010-0.015
Effetto relativo di ostruzioni	Trascurabile	n_3	0.000
	Modesto		0.010-0.015
	Apprezzabile		0.020-0.030
	Elevato		0.040-0.060
Effetto della vegetazione	Basso	n_4	0.005-0.010
	Medio		0.010-0.025
	Alto		0.025-0.050
	Molto alto		0.050-0.100
Grado di sinuosità dell'alveo	Modesto	m_5	1.000
	Apprezzabile		1.150
	Elevato		1.300

Figura 4: metodo per il calcolo del coefficiente di scabrezza nei corsi d'acqua

Il valore del coefficiente di Manning *n* ottenuto risulta pari a 0,0294 s/m$^{1/3}$ corrispondente ad un coefficiente di Strickler K_s di circa 34 m$^{1/3}$s^{-1}.

Il valore di scabrezza ottenuto è stato confrontato con il valore ricavato utilizzando una seconda formula di letteratura che consente di valutare la scabrezza sulla base delle dimensioni medie del materiale d'alveo (*VT Chow, JB Graf*):

$$K_S = \frac{26}{d_{90}^{\frac{1}{6}}}$$

in cui d_{90} rappresenta il diametro corrispondente al 90% del passante (in peso) del campione esaminato. Utilizzando i risultati dell'analisi granulometrica sui campioni prelevati lungo T. Pora (paragr.2.5), si ricava un coefficiente di Strickler di poco superiore a 40 m$^{1/3}$/s.

Le simulazioni del deflusso idrico sono state eseguite adottando pertanto, cautelativamente, il coefficiente di Manning superiore tra i due valori ottenuti, ovvero un coefficiente di Manning *n* pari a 0,0294 s/m$^{1/3}$, uniforme su tutta la sezione, corrispondente ad un coefficiente di Strickler K_s di circa 34 m$^{1/3}$s^{-1} lungo l'intera asta torrentizia in esame.

Successivamente, in seguito all'analisi dell'assetto di progetto, condotta dal punto di visita morfologico al fine di valutarne la stabilità in termini di tendenze evolutive, per la quale si rimanda al paragr.7, i valori di scabrezza sono stati differenziati nell'intervallo compreso tra Ks ~ 30 m$^{1/3}$/s per i tratti a prevalente tendenza al deposito e Ks ~ 35 m$^{1/3}$/s per i tratti con prevalente tendenza erosiva.

Relativamente alle resistenze localizzate dovute sostanzialmente alle variazioni di larghezza della sezione trasversale dell'alveo, sono stati adottati coefficienti pari a 0.1 e 0.3, rispettivamente per la contrazione e l'espansione di sezione.

3.1.3. Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno di monte utilizzate (relative sia allo stato di fatto che alla configurazione di progetto) sono i valori delle portate al colmo per assegnato tempo di ritorno Tr= 50 e 200 anni r definite dal Piano di Bacino vigente pari rispettivamente a 532 m³/s e 663 m³/s.

La condizione di valle è invece costituita dallo sbocco a mare del torrente Pora: per simulare questa condizione è stata inserita all'interno del modello numerico una sezione fittizia rettangolare di

larghezza tale da riprodurre la foce del torrente (sezione "0") a valle dell'ultima sezione rilevata (sezione "1"), imponendo in corrispondenza di tale sezione un livello idrico costante pari a 1.8 m.

In proposito occorre osservare che tale valore deriva dalla valutazione di eventuali interazioni delle condizioni meteomarine sulla condizione di valle in corrispondenza della sezione di foce. Infatti l'elevazione del livello marino dovuto all'azione congiunta del vento sulla superficie marina e dell'attrazione gravitazionale terra-luna e' una caratteristica locale di ogni paraggio in esame. In particolare il contributo del vento dipende dalla estensione della cosiddetta "piattaforma continentale" che, nel caso delle coste italiane, e' alquanto diversificata. Nel caso del mare Adriatico settentrionale (Venezia) questa si estende per 500 km ca.: tale fatto determina, in concomitanza con vento persistente di Scirocco e condizioni di alta marea, il sovralzo del livello fino a 1.8 m ca. rispetto al livello medio del mare. E' questa, senza ombra di dubbio, la condizione più gravosa per i mari italiani in quanto altrove la piattaforma continentale ha una estensione molto più limitata (10-20 km), come ad esempio in corrispondenza delle coste liguri. Ciò porta a ritenere che sia sostanzialmente solo il contributo di marea a determinare la variazione del livello di riferimento per le condizioni al contorno da porre nello studio della foce in oggetto.

Dal punto di vista dell'assetto geomorfologico della foce si ritiene che i sedimenti costituenti la barra di foce non siano tali da resistere alla forza di trascinamento della corrente in condizioni di massima piena.

3.2. Modello idraulico bidimensionale

3.2.1. Struttura generale del codice di calcolo

Per simulare la propagazione degli idrogrammi di piena, per assegnato tempo di ritorno, è stato predisposto un modello matematico bidimensionale in grado di descrivere l'evoluzione dello stato idrometrico e del campo di moto in alveo ed al di là delle sommità arginali di sponda, in caso di esondazione. Il codice di calcolo utilizzato è il BASEMENT, versione 2.2.1, sviluppato da VAW (*Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology*) in collaborazione con ETH (*Swiss Federal Institute of Technology*).

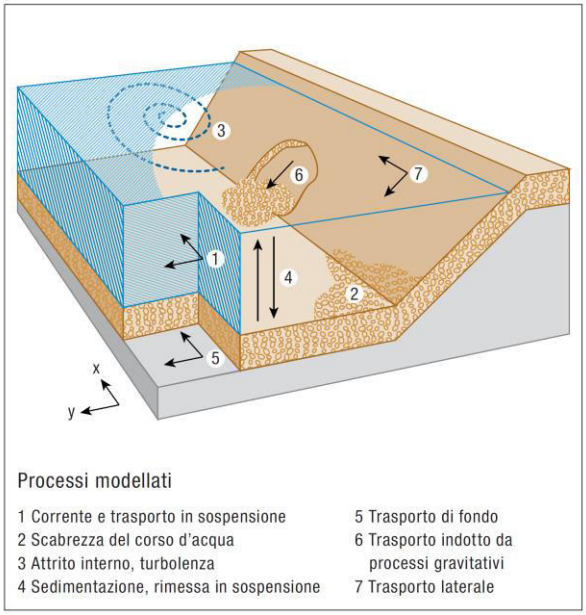
Il programma risolve le equazioni di De Saint Venant bidimensionali, nell'ipotesi di pressione idrostatica lungo la verticale, mediante la tecnica dei volumi finiti che consente di rappresentare in

modo corretto sia deflussi in moto subcritico che supercritico, come pure di descrivere fronti d'onda ripidi come quelli che si verificano in caso di rottura d'argini o dighe. Questa tecnica permette, inoltre, il controllo preciso dell'equazione di continuità nei problemi di flood and dry, risultando quindi particolarmente adatto a descrivere propagazioni di onde su asciutto come quelle che si verificano durante gli allagamenti delle zone golenali.

La risoluzione delle equazioni del moto avviene su una griglia non strutturata che consente di descrivere in dettaglio il dominio di calcolo, permettendo di variare le dimensioni degli elementi, infittendo la griglia di calcolo dove le variazioni geometriche sono più accentuate e/o dove si vuole un livello di dettaglio più accurato. Il modello BASEMENT é quindi idoneo per la modellazione idraulica delle aree perifluviali del Pora temporaneamente allagabili, ovvero per simulare eventi in cui si verificano transizioni secco-bagnato e viceversa, a seguito del transito dell'onda di piena di esondazione proveniente da un tronco fluviale posto a monte.

Il modello è dotato, inoltre, di un modulo morfologico, mediante il quale calcola l'evoluzione nel tempo delle quote del fondo. In pratica, ad ogni passo di calcolo, lo schema numerico risolve dapprima l'idrodinamica, assumendo invariante la geometria del fondo, e poi il trasporto dei sedimenti simulando i fenomeni di erosione e di deposito e calcolando il bilancio dei sedimenti sia al fondo e in sospensione, considerando come invarianti le grandezze idrodinamiche. Tale modo di procedere è giustificato dal fatto che, nella maggior parte dei problemi di evoluzione morfologica, i tempi caratteristici che descrivono le variazioni dell'idrodinamica e quella dei fondali, sono molto diversi tra loro. Ciò consente di trattare i due fenomeni, dal punto di vista della modellazione matematica, in modo disaccoppiato. Nei paragrafi a seguire si fornisce una sintetica descrizione del modulo idrodinamico e del modulo per il calcolo del trasporto dei sedimenti.

Figura 5: Schema dei processi di modellazione simulati in BASEMENT. Illustrazione secondo VAW-ETHZ Zurigo.



3.2.2. Modulo idrodinamico

Il codice BASEMENT, versione 2.2.1, risolve simultaneamente ai volumi finiti una serie di algoritmi che implementano le seguenti equazioni idrodinamiche (*Shallow water equations*):

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(\overline{u}h)}{\partial x}+\frac{\partial(\overline{v}h)}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}+g\frac{\partial h}{\partial x}=-g\frac{\partial z_B}{\partial x}-\frac{1}{\rho h}\tau_{Bx}+\frac{1}{\rho h}\frac{\partial\left[h\left(\overline{\tau}_{xx}+D_{xx}\right)\right]}{dx}+\frac{1}{\rho h}\frac{\partial\left[h\left(\overline{\tau}_{xy}+D_{xy}\right)\right]}{dy}$$

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial t}+\overline{u}\frac{\partial \overline{v}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{v}}{\partial y}+g\frac{\partial h}{\partial y}=-g\frac{\partial z_B}{\partial y}-\frac{1}{\rho h}\tau_{By}+\frac{1}{\rho h}\frac{\partial\left[h\left(\overline{\tau}_{yx}+D_{yx}\right)\right]}{dx}+\frac{1}{\rho h}\frac{\partial\left[h\left(\overline{\tau}_{yy}+D_{yy}\right)\right]}{dy}$$

nelle quali:

- h (m): tirante idrico;
- u,v (m/s) : componenti della velocità media secondo gli assi x e y;
- g (m/s²) : accelerazione di gravità;

- t : tempo;
- x,y (m) : coordinate spaziali orizzontali;
- z_B (m): quota del fondo alveo;
- $\tau_{B,x}$ $\tau_{B,y}$ (N/m²): tensioni tangenziali al fondo secondo gli assi x e y;
- $\tau_{x,x}$, $\tau_{x,y}$, $\tau_{x,y,,}$ $\tau_{y,x}$ (N/m²): tensioni viscose e turbolente;
- $D_{x,x}$, $D_{x,y}$, $D_{x,y,,}$ $D_{y,x}$ (N/m²): termini diffusivi della quantità di moto;
- h, u, v sono le incognite.

Per la soluzione delle equazioni del moto mediante la tecnica ai volumi finiti, le stesse sono riscritte in forma conservativa. Il sistema risultante è quindi mediato su ciascun volume finito della griglia che schematizza il dominio di calcolo e riscritto, in forma discreta, adottando un solutore del problema di Riemann del tipo HLLC (*Toro et al., 1994*) implementato nel codice di BASEMENT.

3.2.3. Modulo a fondo mobile

Il trasporto dei sedimenti è dato dalle due componenti di trasporto solido al fondo e trasporto in sospensione. Il calcolo del trasporto in sospensione viene effettuato tramite l'ausilio dell'equazione del trasporto advettivo-diffusivo. È anche possibile simulare la diffusione di sostanze nocive ed il trasporto del materiale in sospensione. Differenti metodi permettono di descrivere lo scambio dei materiali in sospensione tra il fondo dell'alveo e la colonna dell'acqua. BASEMENT risolve le equazioni di trasporto in modo che i materiali trasportati possano essere classificati in differenti categorie, definite dall'utilizzatore.

L'evoluzione altimetrica del fondo è, come è noto, governata dall'equazione di Exner:

$$(1-p)\frac{\partial z_B}{\partial t}+\sum_{g=1}^{ng}\left(\frac{\partial q_{B_g,x}}{\partial x}+\frac{\partial q_{B_g,y}}{\partial y}+s_g-sl_{B_g}\right)=0$$

in cui p è la porosità dei sedimenti trasportati, z_b è la quota del fondo, t il tempo, q_{Bg} è la portata solida al fondo per unità di larghezza, *g=1….ng* rappresentano le classi di sedimenti, s_g e sl_{Bg} sono i termini sorgente che indicano locali input o output di materiale.

L'equazione precedente è risolta dal modello ad ogni passo di calcolo per fornire l'andamento nel tempo delle quote del fondo, una volta determinati la portata solida al fondo ed i flussi di deposito e di

erosione. Nel modello la portata solida q_{Bg} è calcolata sulla base della ben nota formula di Meyer-Peter e Műller, facendo riferimento al diametro caratteristico dei sedimenti sul fondo, che convenzionalmente si assume pari al d_{50}.

Lo spostamento del materiale dell'alveo può essere originato, oltre che dalla forza orizzontale della corrente, anche in seguito a processi gravitativi quali ad esempio il crollo di una sponda. Questo tipo di processi è rappresentato grazie all'ausilio di un modello geometrico basato sull'angolo critico della scarpata (Figura 6).

3.2.4. Costruzione del modello e condizioni al contorno

La mesh di calcolo è stata costruita utilizzando il programma SMS 11.0 (*Surfacewater Modelling System*) sviluppato dalla Brigham Young University. Essa è stata realizzata discretizzando il territorio in una serie di elementi quadrangolari e triangolari al fine di descriverne con semplificazione geometrica l'andamento plano-altimetrico, in modo il più attinente possibile alla realtà. Tale discretizzazione risulta più di dettaglio nelle zone di maggiore variazione topografica (alveo e zone limitrofe) e di maggiore concentrazione insediativa e nelle zone dove il comportamento idrodinamico del corso d'acqua risulta più complesso.

Ogni nodo della mesh risulta quotato altimetricamente e georeferenziato: in particolare le quote dei nodi sono state valutate, mediante tecniche di interpolazione, a partire dai dati topografici disponibili.

Gli interpolatori determinano il valore della cella con una media, opportunamente pesata, dei punti rilevati che si trovano all'interno di un cerchio, o ellisse, con centro in ogni singola cella.

Il reticolo risulta costituito da circa 28,000 nodi e 48,000 maglie. Le dimensioni dei lati degli elementi variano tra un minimo di circa 3 m, nei punti in cui è richiesto il maggior dettaglio della schematizzazione, come ad esempio lungo l'alveo dell'asta torrentizia, ed un massimo di 10 m nelle aree della piana che si estende sia in sponda destra che sinistra del T.Pora (Finale Marina).

Il reticolo di calcolo comprende l'intero tratto dell'asta torrentizia del T.Pora che si estende dalla confluenza con il T.Aquila alla foce.

La mesh è stata realizzata in maniera tale da individuare, definendoli con specifici elementi, anche gli edifici presenti all'interno dell'area di studio, in modo da poterli eliminare dalla griglia di calcolo, potendo, in questo modo, ottenere la valutazione del moto dell'acqua attorno ad essi, solo nelle

effettive vie che essa ha a disposizione per espandersi durante l'evento di piena. Per far questo si è partiti dall'ortofoto attuale dell'area di interesse, dall'analisi della quale sono stati individuati gli edifici presenti; ogni edificio è stato digitalizzato e la sua esistenza, posizione e dimensione sono state confrontate con quelle riportate nella Carta Tecnica Regionale. Un esempio del risultato di tale digitalizzazione è riportato nella figura di pagina seguente.

La scelta dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler è stata effettuata con il criterio di far corrispondere al meglio possibile il profilo delle quote idrometriche calcolate con il modello bidimensionale e quelle calcolate con il modello unidimensionale. Dopo una serie di simulazioni preliminari si è assunto per il dominio di calcolo relativo all'alveo del T. Pora un unico valore del coefficiente di scabrezza pari a 32 $m^{1/3}s^{-1}$. Per quanto riguarda il territorio esterno all'asta torrentizia, oltre ad aver escluso dal dominio, come precedentemente ricordato, i principali fabbricati, si è provveduto ad attribuire, in analogia ad esperienze analoghe, il valore del coefficiente di scabrezza pari a 50 $m^{1/3}s^{-1}$ alle strade ed al territorio esterno per lo più interamente urbano.

A partire dalla griglia che descrive l'assetto di progetto dell'alveo del T.Pora, unicamente nel tratto interessato dagli interventi di 1 stralcio, è stata predisposta, in seguito, la schematizzazione per prendere in esame l'assetto di progetto definitivo "di lungo termine" del T.Pora lungo l'intero tratto terminale (compreso tra le sezioni 38-1). In tal caso il reticolo è stato modificato solo localmente, lungo il tratto compreso tra le sezioni 23-38 (a monte degli interventi di 1 stralcio fino alla confluenza con il T. Aquila) per adattare il dominio di calcolo alle modifiche che verranno introdotte dagli interventi di futuro completamento/sistemazione.

Le condizioni al contorno per le simulazioni consistono essenzialmente nell'assegnazione dell'andamento nel tempo della portata sui nodi della sezione di monte del modello e nell'assegnazione dell'andamento del livello sui nodi del bordo libero in mare.

Per i calcoli in ipotesi di fondo fisso, descritti nei paragrafi successivi, sono stati utilizzati eventi di piena aventi tempi di ritorno di 50, 200 e di 500 anni. I valori massimi delle portate lungo il T. Pora a valle della confluenza con il T. Aquila sono pari a 532 m^3/s per l'evento cinquantennale, 663 m^3/s per quello due centennale e 750 m^3/s per quello cinque centennale.

Per quanto riguarda la sezione di valle del dominio, sono stati assunti differenti scenari per il livello del mare di riferimento. In particolare è stato esaminato l'effetto di livelli variabili tra le quote 0.0 e +1.8 m

s.m.m., essendosi ritenuta quest'ultima condizione come rappresentativa delle condizioni più gravose che si potrebbero verificare per effetto combinato della marea e del moto ondoso.

Le simulazioni a fondo mobile sono state necessariamente effettuate in condizioni di moto vario, per valutare l'evoluzione del fondo nel corso dell'evento e gli effetti di tale evoluzione sulla dinamica dell'evento stesso. Anche le simulazioni a fondo fisso sono state condotte in condizioni di moto vario, al fine di valutare la risposta dell'intero sistema torrentizio del T. Pora e Aquila, durante gli eventi di piena, e conseguentemente tracciare la perimetrazione della pericolosità residua.

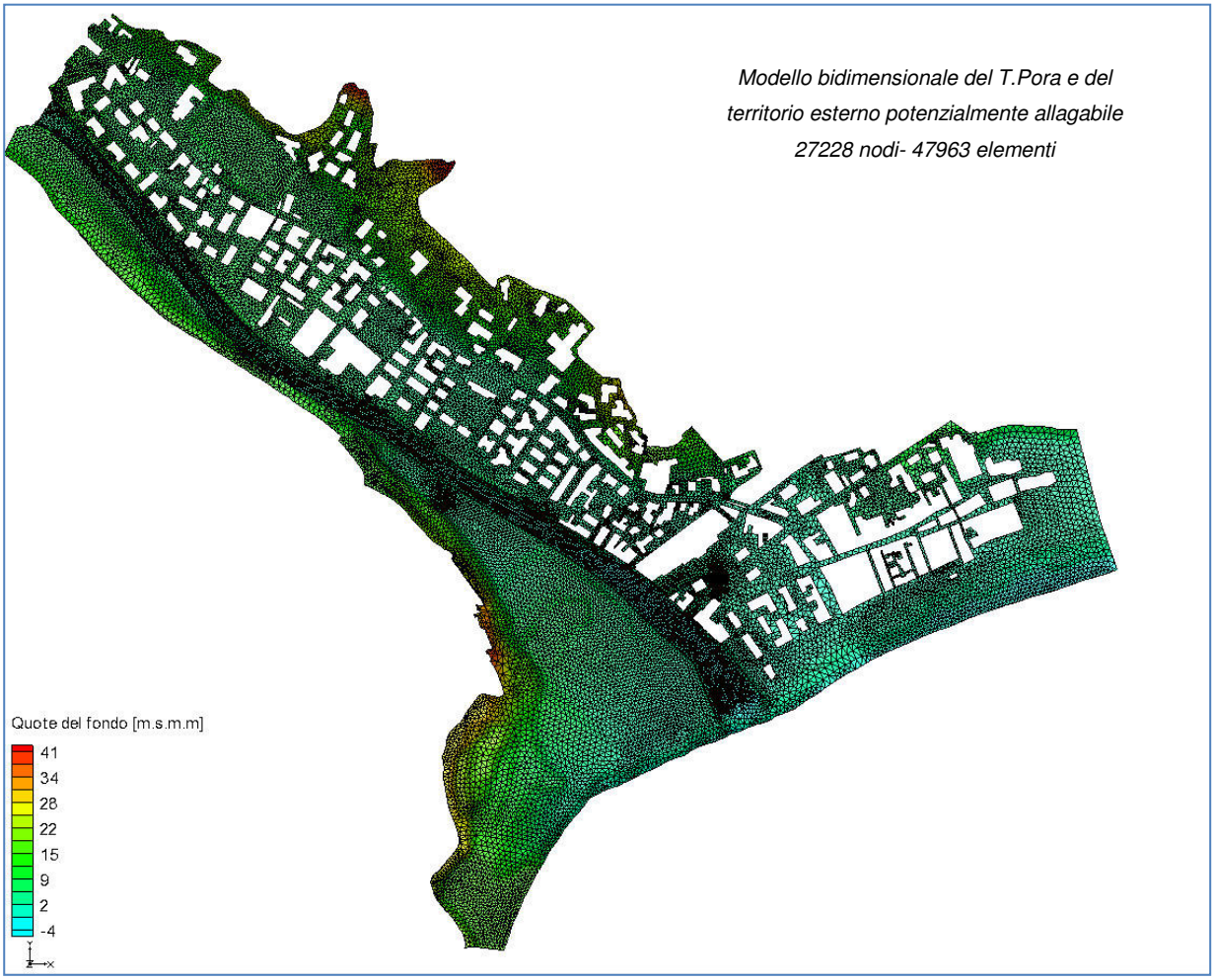
Per quanto riguarda le simulazioni a fondo mobile, come si è detto nel *precedente paragrafo 3.2.3*, il modello matematico valuta l'entità del trasporto solido al fondo ipotizzando sedimenti granulari omogenei di cui deve essere noto il diametro medio. In base alle curve granulometriche disponibili si è potuto stabilire il valore verosimile per il diametro medio (d_{50}) in 15 mm. Alcune simulazioni sono state peraltro effettuate anche assumendo un diametro di 30 mm (d_{75}), per verificare la risposta del modello con riferimento alle pezzature maggiori della curva granulometrica (Figura 1).

Le condizioni al contorno per le simulazioni a fondo mobile consistono nell'assegnare ad alcuni nodi la condizione di "nodo fisso", e ad altri quella di "nodo inerodibile".

Nel primo caso la condizione impone che quel nodo si mantenga, nel corso della simulazione, sempre alla stessa quota, e ciò significa che per esso il bilancio di massa deve risultare sempre equilibrato, in modo che il materiale eventualmente eroso o depositato sia compensato istante per istante da equivalenti immissioni o prelievi di materiale dall'esterno. Questa condizione è stata applicata sulle sezioni di valle (mare) e di monte del modello simulando in tale modo che si realizzi una condizione di equilibrio dinamico con riferimento al trasporto solido. Tuttavia, allo scopo di non inficiare i risultati in corrispondenza delle sezioni più prossime alla confluenza del T. Pora con il T. Aquila, si è ritenuto opportuno estendere il dominio del modello per un tratto a monte del T. Aquila, pari a circa 200m, e dello stesso T. Pora per un tratto di circa 50m ed applicare in corrispondenza dei nodi di monte la condizione di cui sopra.

La seconda condizione di "nodo inerodibile" indica che la quota del nodo non può scendere al di sotto della quota iniziale, mentre è possibile che sul nodo si depositi materiale pertanto, se la sua quota ad un determinato istante è superiore a quella iniziale, che esso si eroda fino a raggiungerla. Quest'ultima condizione è stata applicata per descrivere il comportamento dell'alveo ove esso può essere considerato inerodibile, e cioè in corrispondenza dei muri di sponda verticali.

Figura 6: Reticolo di calcolo del modello bidimensionale del T. Pora e Aquila a Finale Ligure.



4. VERIFICA IDRAULICA DELLO STATO DI FATTO

La verifica idraulica dell'attuale capacità di deflusso del tratto fluviale oggetto della presente fase di progettazione preliminare è stata effettuata in condizioni di moto permanente tramite il modello numerico monodimensionale.

Il torrente Pora nel tratto a valle dalla confluenza con l'Aquila presenta, pressoché ovunque, una sezione d'alveo regolare, poco difforme dalla rettangolare, che va progressivamente allargandosi verso valle: la larghezza di base passa infatti da 20 m circa nella zona più a monte (in prossimità della sezione 34) a 65 m circa in corrispondenza dello sbocco a mare. La pendenza media di fondo è pari allo 0.37 %.

Le simulazioni effettuate evidenziano la grave insufficienza idraulica del tratto terminale che determina la potenziale esondabilità già in concomitanza di un evento di piena con tempo di ritorno cinquantennale. L'elevata criticità idraulica è determinata, in particolare, dalla presenza dei due manufatti di attraversamento esistenti lungo la linea RFI e lungo la strada Aurelia e, secondariamente, dall'insufficienza delle sezioni di deflusso. Nel tratto tra il ponte RFI e la foce le attuali sezioni sono sufficienti al contenimento in alveo della portata cinquantennale, anche se con franco di sicurezza inadeguato, mentre lungo il tratto compreso tra il ponte di via Sagittario ed il ponte RFI, i livelli idrici superano le sommità arginali in maniera diffusa e con tiranti elevati, determinando potenziali condizioni di allagamento per esondazione diretta nel tratto dell'abitato di Finale Marina in sponda sinistra.

Il *ponte in ferro di via Sagittario* che collega la parte centrale di Finale Ligure con la SS 490 del Colle del Melogno (sezioni 20-21) risulta essere totalmente sommerso anche per eventi con tempo di ritorno inferiore ai 50 anni.

Si evidenzia inoltre la necessità di adeguare le difese spondali mediante l'occlusione delle aperture (finestre, varchi, accessi,…) situate lungo gli attuali argini del torrente in sponda sinistra (*elaborato 9-foto 2, 5 e 6*), fra le quali quelle nel tratto immediatamente a monte del ponte RFI (sez.9-10) e presenti nel tratto tra il ponte RFI ed il ponte della strada Aurelia (sez.6-5).

5. VERIFICA IDRAULICA DELLA SOLUZIONE PROGETTUALE

5.1. Criteri progettuali adottati

I criteri di dimensionamento idraulico assunti per la definizione dell'assetto di progetto (in tutto il tratto compreso tra la confluenza Pora-Aquila e la foce) comprendono:

- l'adozione della portata di progetto avente tempo di ritorno 200-ennale (definita dal Piano di Bacino vigente);
- l'ottenimento per tutte le sezioni fluviali di un franco di sicurezza non inferiore a 0,5 metri;
- il posizionamento delle quote di sottotrave dei nuovi attraversamenti al di sopra della quota della linea dell'energia o tali da garantire un franco di almeno un metro;
- il mantenimento dell'assetto altimetrico complessivo della sponda sinistra il più possibile aderente allo stato di fatto, al fine di contenere il più possibile gli interventi di adeguamento in quota delle sommità delle sponde;
- il mantenimento dell'assetto altimetrico del fondo alveo il più possibile nello stato di fatto ad eccezione degli interventi di riprofilatura conseguenti alla demolizione della spessa platea d'alveo in calcestruzzo esistente a valle del ponte RFI, realizzata in passato a protezione e consolidamento delle pile dell'esistente ponte RFI.

5.2. Descrizione dell'alveo nello stato di progetto

In relazione ai criteri di intervento sopra definiti si è proceduto ad individuare l'assetto plani-altimetrico di progetto complessivo del nuovo alveo.

La livelletta di fondo viene regolarizzata secondo le pendenze dello 0.5% tra la sezione 20 e la sezione 8, per poi proseguire, fino alla foce, con pendenza pari allo 0.22%. Lungo l'intero tratto compreso tra la sezione 20 (ponte di via Sagittario) e la foce è previsto l'allargamento della sezione dell'alveo in destra idraulica e la realizzazione di nuove difese spondali mediante soluzioni costruttive analoghe a quelle già presenti lungo la sponda sinistra: opere di difesa a parete verticale e muro di contenimento sommitali utilizzati con funzione di parapetto per gli adiacenti percorsi pedonali e veicolari.

L'ampliamento dell'alveo del T.Pora in tutto il suo tratto terminale risulta complessivamente pari a circa il 15% della superficie dell'alveo attuale. Tale ampliamento consentirà sia l'aumento delle portate

smaltibili dal torrente in condizioni di sicurezza idraulica e sia una forte riduzione dei livelli idrici, con conseguente riduzione della pensilità del profilo di piena.

Relativamente agli attraversamenti, l'elevata criticità connessa agli attraversamenti della linea FF.SS. Genova – Ventimiglia e della strada Aurelia, ha reso necessario prevedere il completo rifacimento delle strutture esistenti, mediante costruzione di nuovi manufatti che non prevedono nessuna opera di sostegno dell'impalcato collocata in alveo. È inoltre prevista la rimozione del ponte Bailey di via Sagittario e la realizzazione di un nuovo attraversamento veicolare collocato più a valle (sez.16) rispetto all'attuale (in corrispondenza della Via Nievo).

Contestualmente, per quando riguarda la parte dell'asta torrentizia a monte del tratto oggetto degli interventi di sistemazione idraulica - 1°stralcio (sez.23-sez.1) fino alla confluenza Pora-Aquila (sez.23-sez.37), l'assetto di progetto prevede la riprofilatura del fondo alveo nel tratto compreso tra le sezioni 30-24 secondo una livelletta con pendenza pari a 0.5% e l'allargamento, ove possibile, delle sezioni d'alveo in sponda destra (tratto compreso tra le sez.37 - sez.28).

5.3. Analisi in moto monodimensionale

Le simulazioni effettuate hanno permesso di verificare il comportamento dell'intero tratto del T.Pora compreso tra la confluenza Pora-Aquila e la foce nella configurazione di progetto con riferimento ad eventi di piena aventi tempo di ritorno di 50 e 200 anni.

L'attuazione dell'intervento stralcio di sistemazione garantirà un franco minimo di 50 cm in relazione ad un evento duecentennale per l'intero tratto che si estende dall'attuale ponte di via Sagittario fino alla foce. Il franco residuo in corrispondenza del nuovo ponte di via Nievo risulta dell'ordine di 1.0 m mentre il posizionamento delle quote di sottotrave dei nuovi attraversamenti sulla strada Aurelia e sul ponte RFI risulta al di sopra della quota della linea dell'energia (quota di sottotrave pari a 5.00 m).

Come appare evidente dal confronto dei profili longitudinali, riportati a seguire, nel tratto di interesse, il nuovo assetto di progetto del torrente, rispetto allo stato di fatto, consente una forte riduzione dei livelli idrici, dell'ordine anche di qualche metro in prossimità dei nuovi attraversamenti, con conseguente riduzione della pensilità del profilo di piena.

Con riferimento alle velocità massime, dagli allegati al presente elaborato si evince che, nei tratti percorsi in regime supercritico, le velocità superano ampiamente i 6 m/s e, raggiungendo il valore limite

di circa 8 m/s in corrispondenza della sezione 23. Anche nei tratti percorsi in corrente lenta, peraltro, le velocità sono molto sostenute, dato che esse sono per lo più superiori a 4 m/s.

Si rimanda all' Allegato A al presente elaborato di progetto per il dettaglio dei risultati relativi alla verifica idraulica condotta (sezioni trasversali schematizzate nel modello di calcolo).

Figura 7: Profilo longitudinale del T.Pora in corrispondenza di un evento due centennale –Assetto di progetto

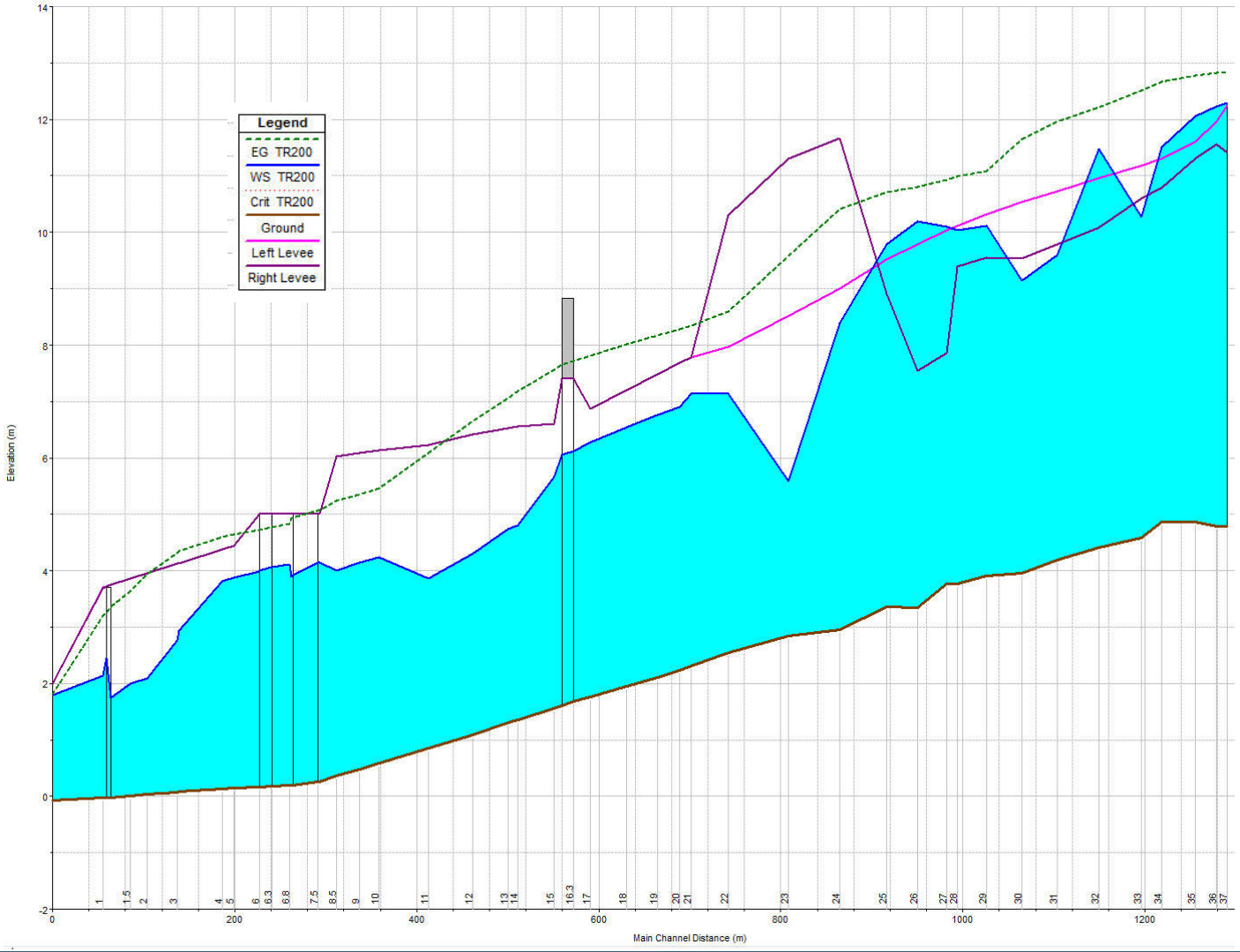
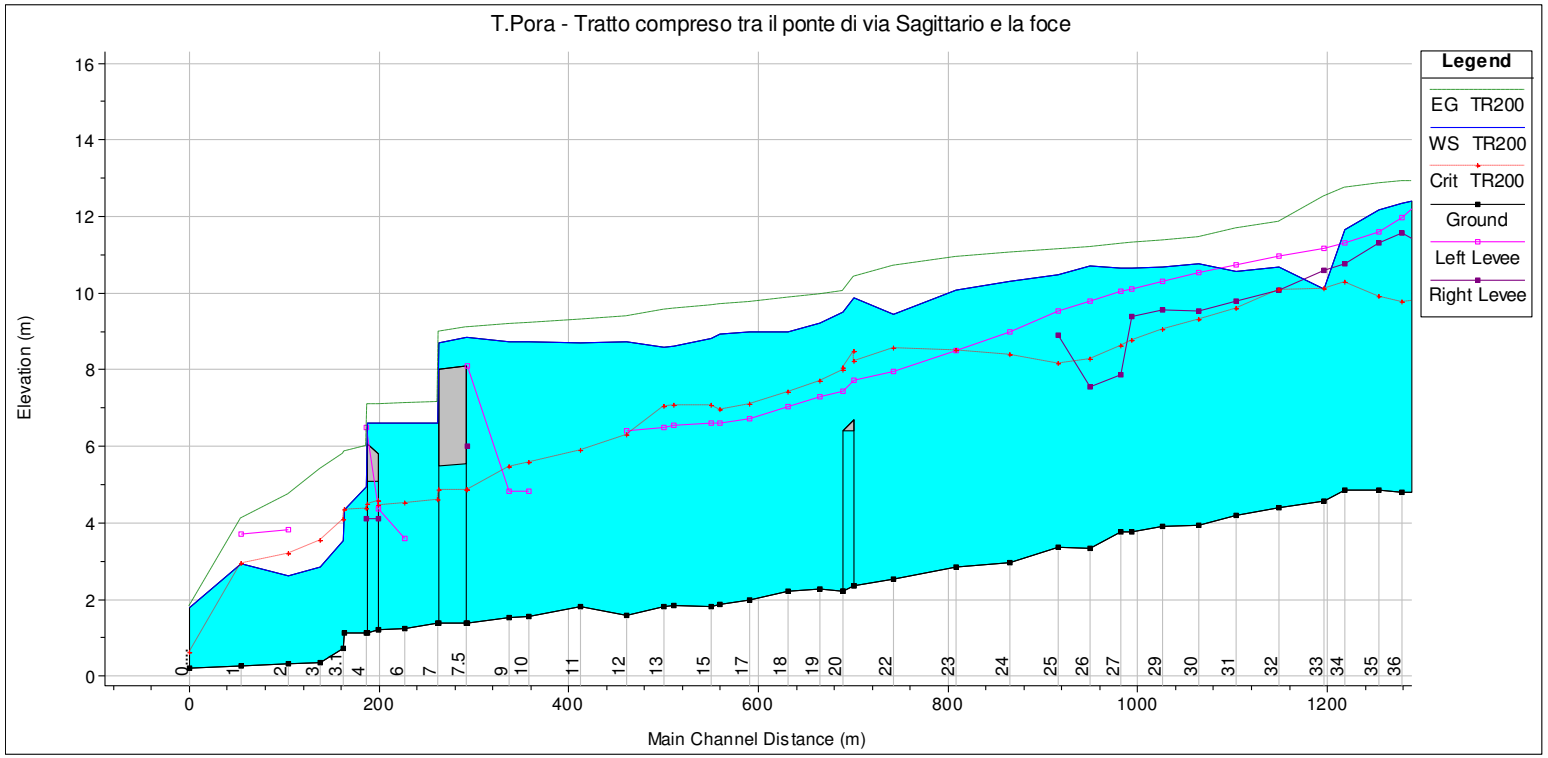


Figura 8: Profilo longitudinale del T.Pora in corrispondenza di un evento due centennale – Stato di fatto



5.4. Analisi in moto bididimensionale

La configurazione di progetto nel tratto terminale del T. Pora è stata implementata nel modello di calcolo bidimensionale a fondo fisso. Le quote di fondo alveo in corrispondenza della sezione alla foce (sez.1) sono state inserite nel modello di calcolo considerando, cautelativamente, l'eventuale presenza di quantità di materiale di deposito -barra di foce-, che potrebbe quindi ridurre la sezione utile di deflusso.

L'analisi a fondo mobile dimostrerà in seguito, che data la granulometria del materiale d'alveo e la velocità della corrente di piena è corretto considerare, in fase di verifica idraulica, la completa erosione e rideposizione a mare dei sedimenti stessi in concomitanza del passaggio del colmo della piena.

Le simulazioni sono state condotte con riferimento agli eventi con tempo di ritorno di 200 (portata al colmo Q=663 m^3/s) e 50 anni (portata al colmo Q=532 m^3/s).

La condizione al contorno di monte è rappresentata dall'idrogramma della portata relativo al bacino del T. Pora chiuso alla foce. La condizione al contorno di valle è rappresentata dal livello del medio mare posto pari a 0 m.

Come già evidenziato nelle simulazioni eseguite mediante l'utilizzo del modello monodimensionale, l'assetto di progetto "di lungo termine" del tratto terminale del T.Pora consente di smaltire in condizioni di sicurezza idraulica, quindi senza alcun sormonto delle difese di sponda sia in destra che in sinistra idraulica, le onde di piena cinquantennale e due-centennale. Le figure a seguire riportano i profili idrici e la linea dell'energia in corrispondenza del passaggio del colmo di piena rispettivamente per Tr pari a 50 e 200 anni. Dai grafici si evince che il franco idraulico rispetto alla sommità delle difese assume valori compresi tra 0.5 m e circa 2.5 m in relazione all'evento cinquantennale, e valori compresi tra 0.5 m e circa 2 m in relazione all'evento due-centennale. Si sottolinea che unicamente in corrispondenza della sezione 1 (foce) il franco idraulico si riduce fino a circa 10-20 cm tuttavia tale risultato rimane del tutto accettabile considerando che tale sezione è tracciata già in prossimità dell'area di spiaggia che si estende alla foce del T.Pora e che la geometria dell'alveo inserita ha tenuto conto della presenza di quantità di materiale di deposito, barra di foce, in grado quindi di ridurre la sezione utile di libero deflusso al passaggio del colmo della piena.

Figura 9: Simulazione in condizioni di moto vario per la portata con Tr=50 anni (530 m³/s) e livello mare 0 m in ipotesi a fondo fisso.

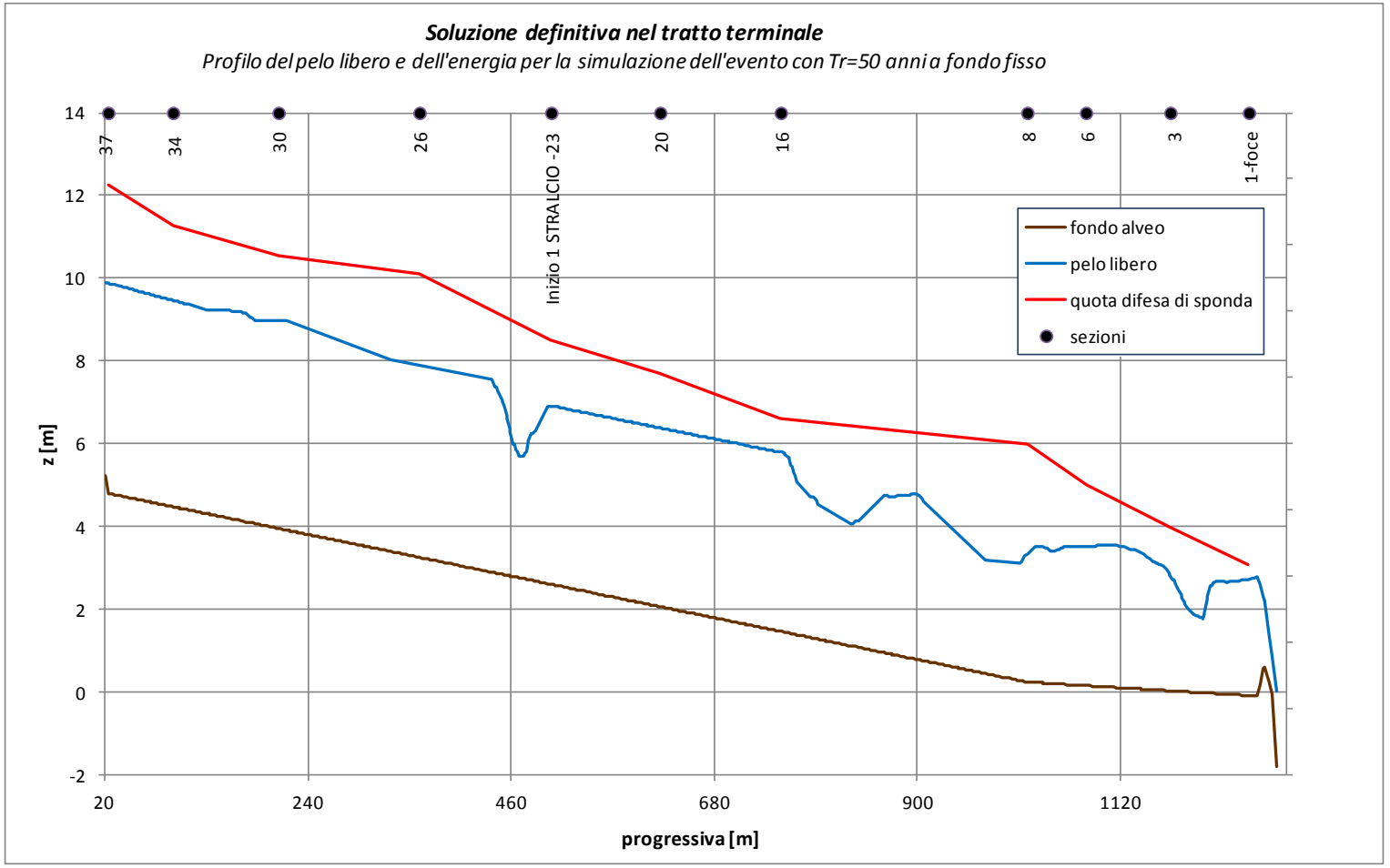
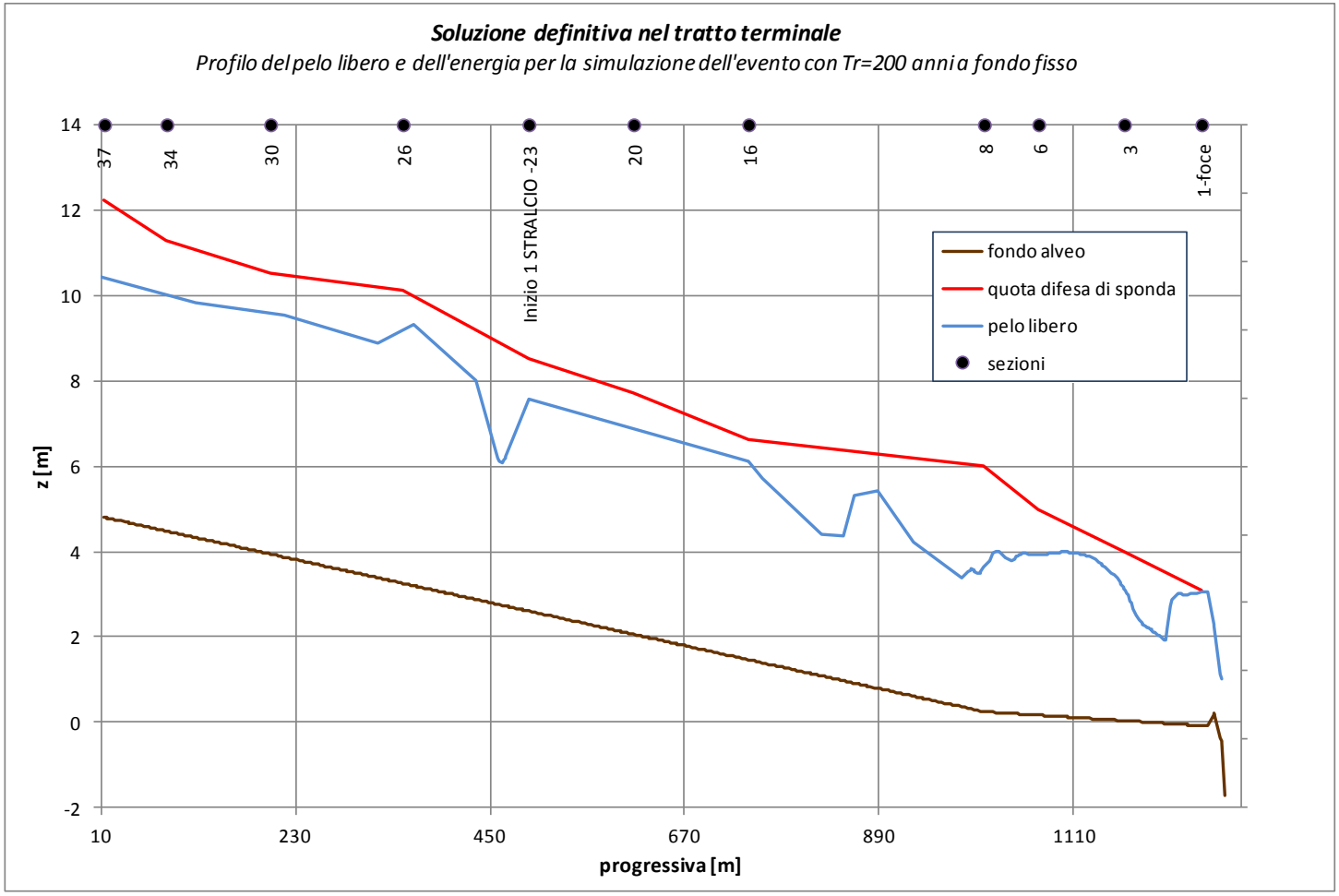


Figura 10: Simulazione in condizioni di moto vario per la portata con Tr=200 anni (663 m³/s) e livello in mare 0 m in ipotesi a fondo fisso.



Le immagini a seguire mostrano la distribuzione del modulo delle velocità rispettivamente in corrispondenza degli eventi di piena cinquantennale e duecentennale. Le velocità massime si mantengono elevate anche con la portata cinquantennale, dato che, in generale, esse superano i 3 m/s (nei tratti in cui la corrente è subcritica) e i 6 m/s nei tratti in cui la corrente è supercritica.

Figura 11: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo fisso – Mappa del modulo delle velocità lungo il tratto terminale - Tr50 anni.

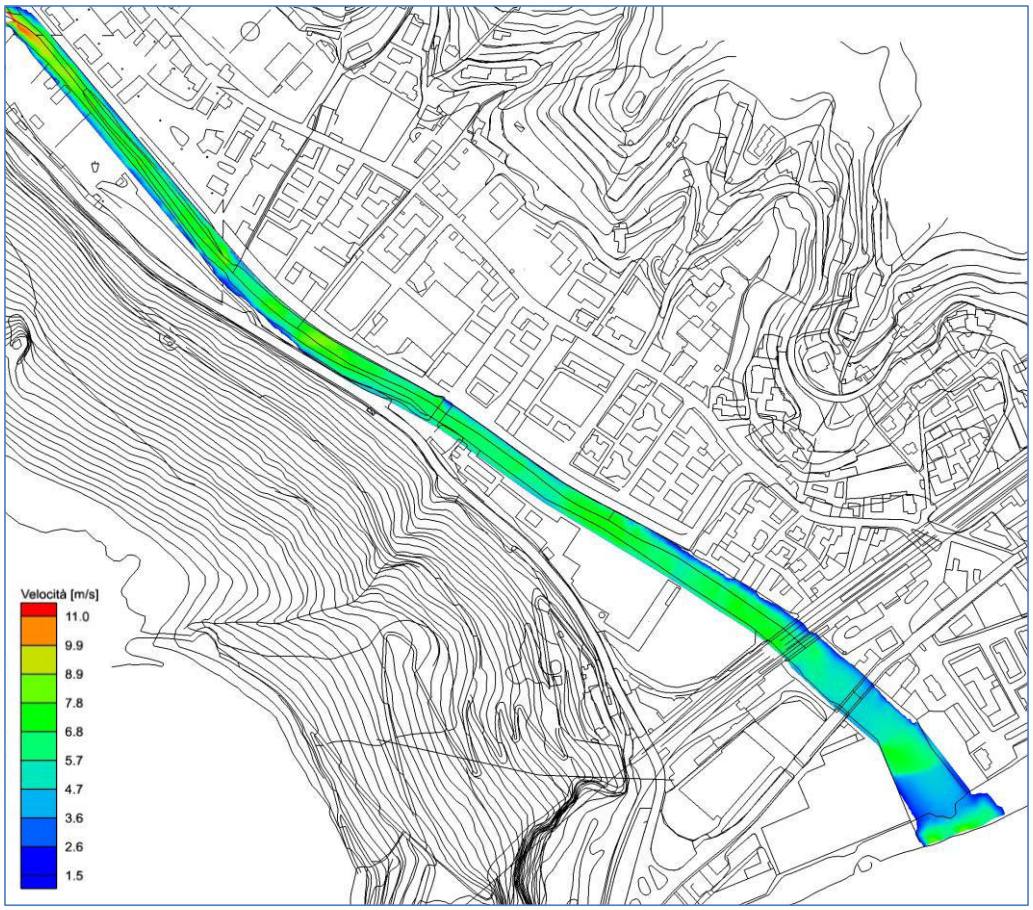
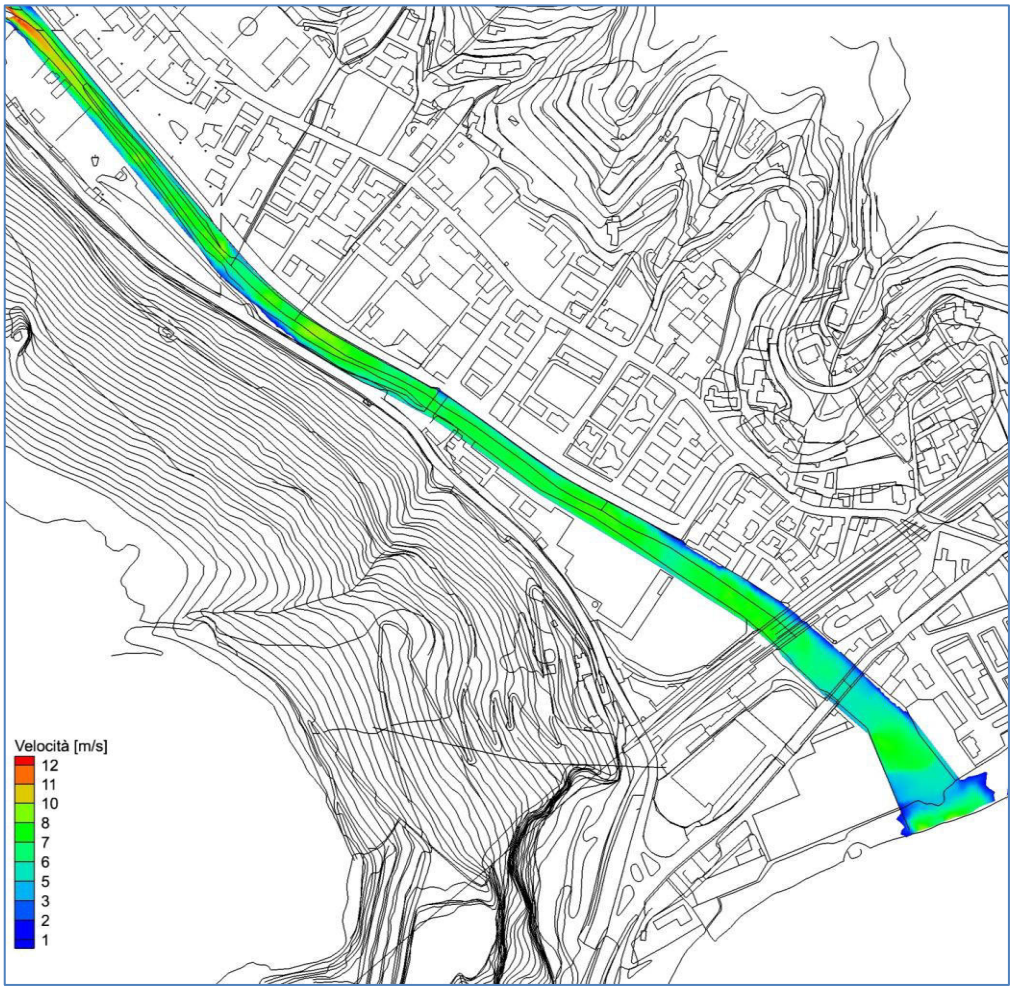


Figura 12: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo fisso – Mappa del modulo delle velocità lungo il tratto terminale – Tr200 anni.



6. VERIFICA IDRAULICA DELLA CONFIGURAZIONE DI 1 STRALCIO

La configurazione relativa alla realizzazione della soluzione degli interventi di 1 stralcio, nel tratto terminale del T.Pora, compreso tra il ponte di via Sagittario e la foce, è stata implementata nel modello di calcolo bidimensionale a fondo fisso. Le quote di fondo alveo in corrispondenza della sezione alla foce (sez.1) sono state inserite nel modello di calcolo considerando, cautelativamente, l'eventuale presenza di quantità di materiale di deposito -barra di foce-, che potrebbe quindi ridurre la sezione utile di deflusso.

La condizione al contorno di monte è rappresentata dall'idrogramma di portata, per assegnato tempo di ritorno, relativo al bacino del T. Pora chiuso alla confluenza con il T. Aquila.

La condizione al contorno di valle è rappresentata dal livello del medio mare posto pari a 0 m.s.m.m..

Le simulazioni sono state condotte con riferimento agli eventi con tempo di ritorno di 200 (portata al colmo Q=663 m3/s) e 50 anni (portata al colmo Q=532 m3/s).

Come già evidenziato nelle simulazioni eseguite mediante l'utilizzo del modello monodimensionale, le sezioni di progetto lungo il tratto interessato dagli di interventi di 1 stralcio (sez.23-1) del T. Pora sono in grado di smaltire, in condizioni di sicurezza idraulica, quindi senza alcun sormonto delle difese di sponda sia in destra che in sinistra idraulica, le onde di piena cinquantennale e duecentennale. Nel tratto di monte del T. Pora invece le simulazioni effettuate hanno confermato problematiche di insufficienza idraulica legate al sottodimensionamento delle sezioni di deflusso ed alla inadeguatezza delle difese di sponda esistenti in particolare in destra idraulica in relazione alla piena 50-ennale, e sia in destra che sinistra idraulica in relazione all'evento 200-ennale.

L'applicazione del modello 2D in condizioni di moto non stazionario ha consentito di valutare la propagazione sul territorio circostante dell'esondazione residuale in occasione di eventi di piena con tempo di ritorno di 50, 200 e 500 anni. Nelle pagine a seguire si riporta la mappa degli allagamenti ottenuta dall'applicazione del modello 2D per eventi di piena 50-ennali, 20-ennali e 500-ennali in ipotesi di fondo alveo fisso.

6.1. Evento con tempo di ritorno di 50 anni

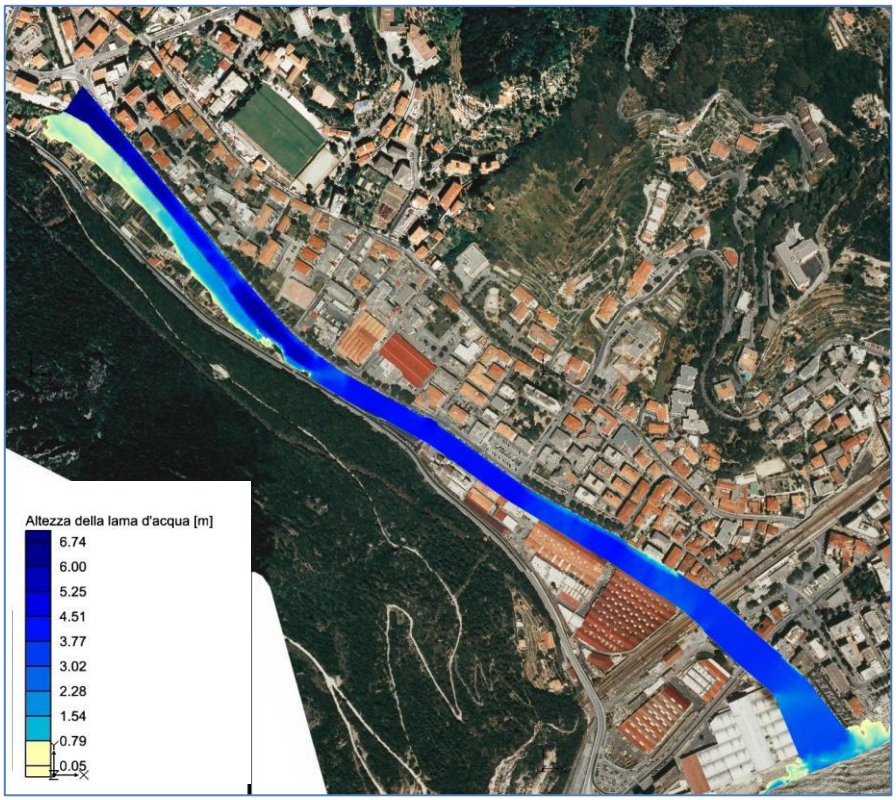
In relazione all'evento di piena 50-ennale la simulazione condotta, attraverso il modello di calcolo bidimensionale, ha evidenziato che il passaggio del picco della piena crea un allagamento residuo lungo

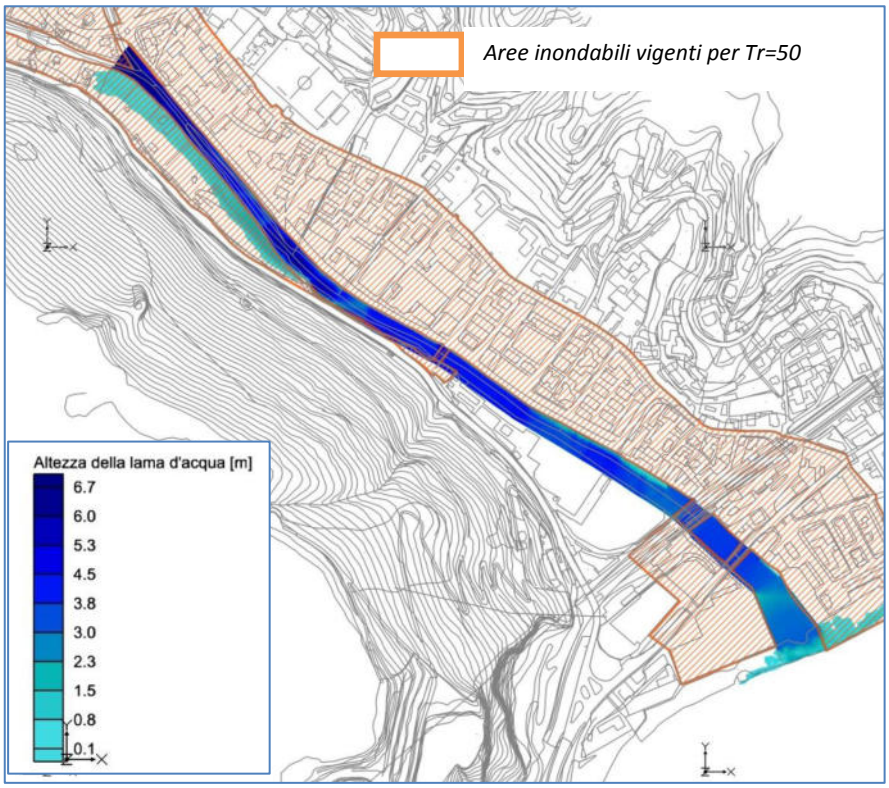
le aree perifluviali, in destra idraulica del T.Pora, a monte del tratto di asta torrentizia interessata dagli interventi di 1 stralcio. Le difese spondali esistenti si verificano infatti, inadeguate in destra idraulica sia in prossimità della confluenza, sez.37-36, che più a valle in corrispondenza delle sezioni 30-26 causando allagamenti delle aree limitrofe con una lama d'acqua dell'ordine di 50÷100 cm. Gli allagamenti rimangono tuttavia circoscritti alle aree di monte quindi non sono tali da coinvolgere la piana di Finale Marina in destra idraulica né ancor meno l'ex area Piaggio.

In sinistra idraulica le difese di sponda lungo l'intero tratto in esame risultano adeguate a garantire il deflusso delle portate in alveo durante l'intero evento di piena.

Si evidenzia quindi come gli interventi di sistemazione idraulica risultino del tutto risolutivi lungo il tratto di interesse (1 stralcio compreso tra le sez.1-23) e contestualmente, consentano di ridurre l'estensione delle aree inondabili residuali rimanendo quest'ultime rispettivamente più contenuta, rispetto alla vigente mappatura in destra idraulica, ed assente in sinistra idraulica.

Figura 13: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo fisso – Mappa degli allagamenti ottenuti in corrispondenza di un evento con Tr= 50 anni e sovrapposizione con le vigente fascia "A"





6.2. Evento con tempo di ritorno di 200 anni

La mappa degli allagamenti risultante dalla simulazione dell'evento 200-ennale viene riportata in Figura 14. La simulazione è stata condotta nell'ipotesi che l'intero idrogramma di portata, relativo all'evento considerato, giunga alla confluenza del T.Pora con il T.Aquila senza quindi tener conto di eventuali esondazioni che si potrebbero verificare lungo i tratti di monte tali da produrre effetti di laminazione sul colmo della piena.

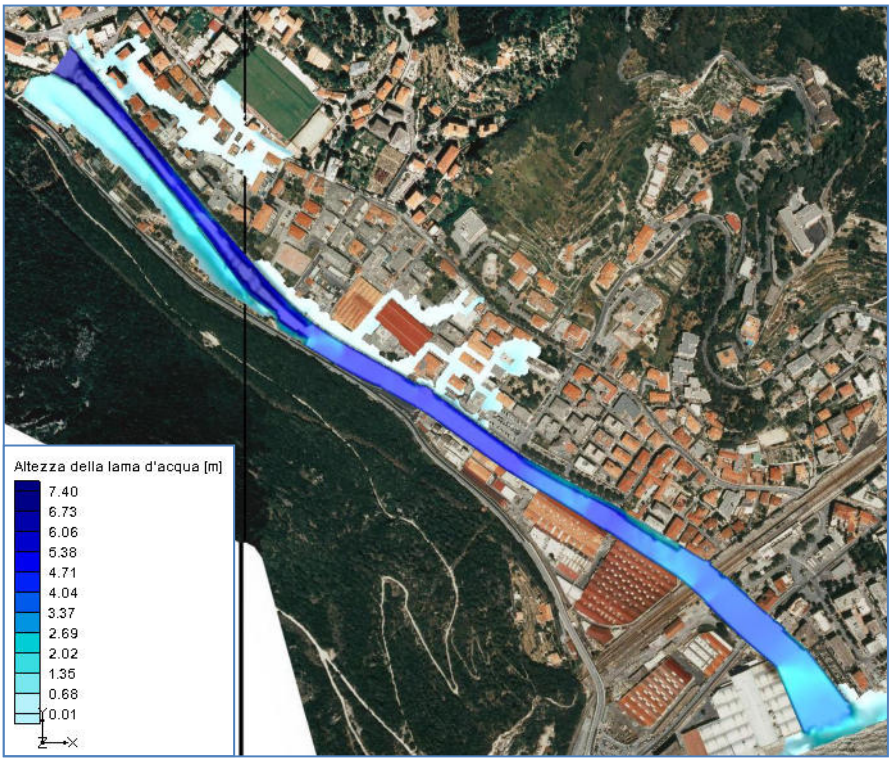
La mappa degli allagamenti mette in evidenza che l'onda di sommersione in arrivo da monte si genera dal sormonto di entrambe le difese di sponda del T.Pora, lungo l'intero tratto compreso tra le sez. 37-26 in destra idraulica, mentre in sinistra idraulica in prossimità delle sez. 37-34 e poi più a valle in corrispondenza delle sez. 26-25.

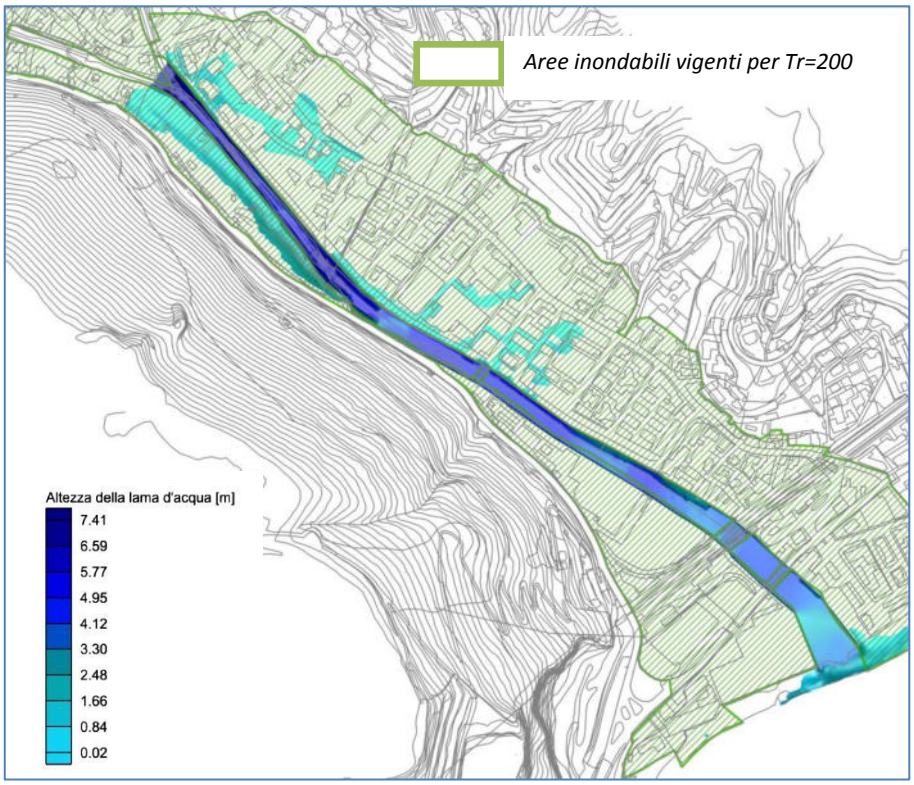
Gli allagamenti in destra idraulica, con una lama d'acqua dell'ordine di 50÷150 cm, rimangono circoscritti alle aree di monte e non sono dunque tali da coinvolgere l'area della piana di Finale Marina ne ancor meno l'ex area Piaggio. In sinistra idraulica gli allagamenti residui coinvolgono parte delle aree abitate della piana con tiranti dell'ordine di 10-50cm. Le aree inondate si estendono dalla confluenza lungo via Dante e lungo via Brunenghi includendo alcune le strade laterali. L'entità degli

allagamenti non risulta tale da propagarsi verso valle lungo la piana sino in prossimità della foce del T.Pora.

Dai risultati ottenuti si evince quindi come gli interventi di sistemazione idraulica risultino risolutivi lungo il tratto di interesse (1 stralcio compreso tra le sez.1-23) in relazione all'evento considerato e contestualmente, consentano di ridurre significativamente l'estensione della fascia inondabile per Tr=200 anni.

Figura 14: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo fisso – Mappa degli allagamenti ottenuti in corrispondenza di un evento con Tr=200 e sovrapposizione con la vigente fascia "B"

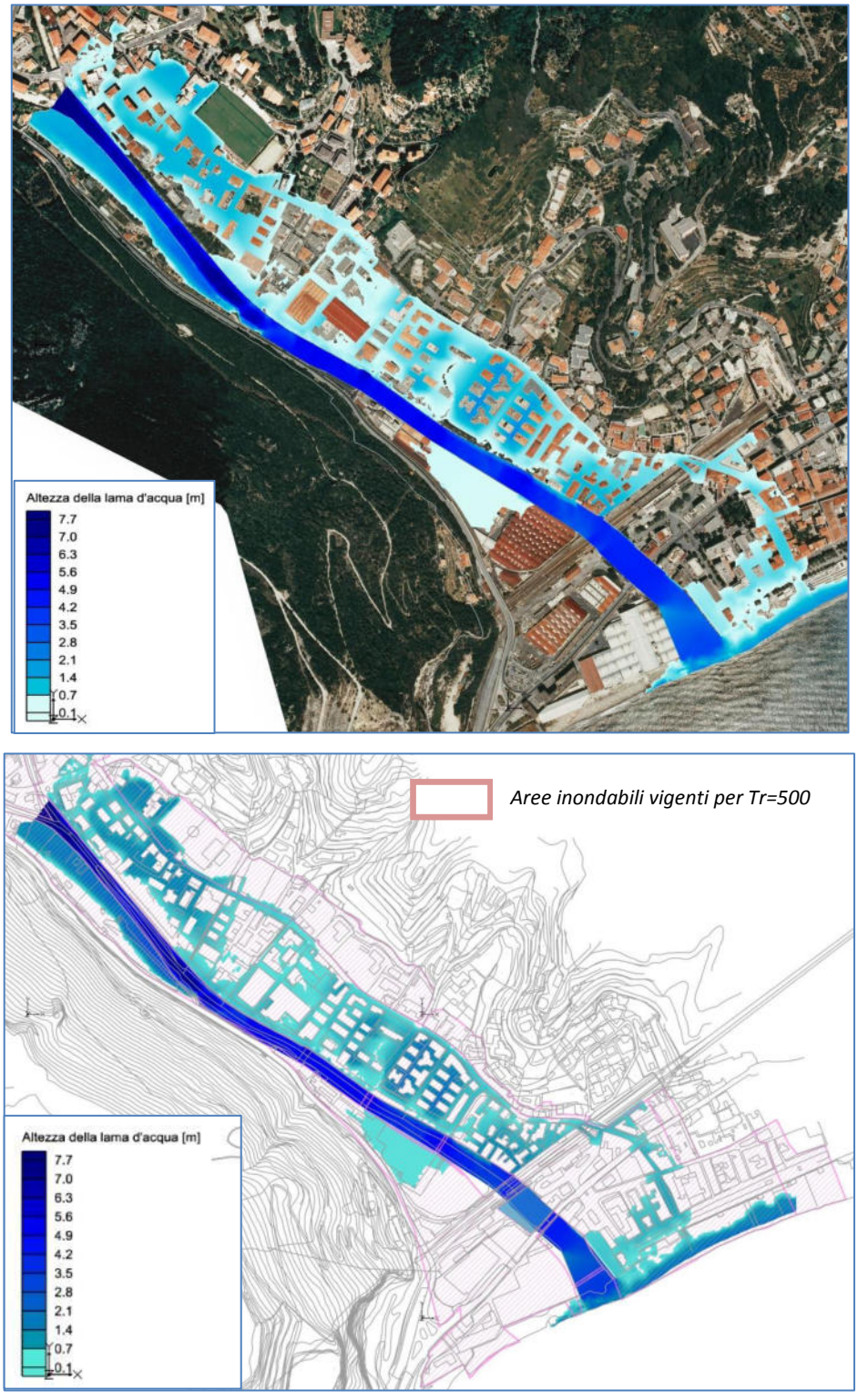




6.3. Evento con tempo di ritorno di 500 anni

La mappa degli allagamenti relativa all'evento 500-ennale (vedi Figura 15) mostra che le esondazioni residue in sinistra idraulica rimangono per lo più invariate rispetto alla carta delle aree inondabili del Piano di Bacino vigente. In sinistra idraulica gli allagamenti residui si propagano infatti, dalla confluenza verso valle, lungo via Brunenghi, via Dante e diverse strade laterali, sino in prossimità della foce del T.Pora interessando quindi l'intero abitato di Finale Marina. In destra idraulica gli allagamenti lungo le aree perifluviali del tratto di monte (sez.37-25) hanno un'estensione del tutto paragonabile con quella della vigente fascia C" mentre, nel tratto verso valle, solo in corrispondenza delle sezioni 20-17 le difese di sponda in progetto vengono sormontate dalla piena con tiranti che sebbene minimi, dell'ordine di poche decine di centimetri, tuttavia sono tali da creare allagamenti residui che si propagano all'interno di parte dell'ex area Piaggio.

Figura 15: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo fisso – Mappa degli allagamenti ottenuti in corrispondenza di un evento con Tr=500 e sovrapposizione con la vigente fascia "C"



7. VALUTAZIONI DELLE TENDENZE EVOLUTIVE DELL'ALVEO

7.1. Metodologia adottata

I fenomeni legati al trasporto di materiali litoidi riguardano essenzialmente due modi di mobilitazione dei materiali in dipendenza soprattutto dal rapporto che l'acqua trattiene con i materiali stessi. In un caso si ha una corrente che mantiene le proprie caratteristiche pur trascinando sul fondo ed in sospensione materiali di varia natura; nell'altro caso la corrente è costituita da un impasto fluido di detriti nella quale l'acqua ha la funzione di fluidificante: tale colata detritica è nota col termine di *debris flow* e può avere effetti distruttivi di singolare potenza.

I due fenomeni descritti dipendono generalmente da numerosi fattori spesso di difficile determinazione essendo legati alla variabilità dei versanti e degli alvei torrentizi, alla loro geomorfologia, all'interazione tra gli elementi trasportati.

In particolare gli interventi di progetto intendono far fronte ai problemi determinati dal primo tipo di trasporto solido descritto che possono causare l'intasamento e il malfunzionamento delle opere esistenti ed in progetto per il deflusso in sicurezza delle portate di pioggia.

Le leggi che governano questo tipo di fenomeno possono generalmente ricondursi ad una relazione di equilibrio tra l'azione motrice esercitata dalla corrente e un'azione resistente dipendente dalle dimensioni, dalla forma dei granuli oltre che dalle interazioni reciproche, e dalle caratteristiche del ricoprimento erboso, qualora presente; fornendo quindi il valore della tensione tangenziale critica in funzione delle caratteristiche idrauliche del moto e del materiale solido presente in alveo.

L'inizio del moto delle particelle costitutive dell'alveo di un corso d'acqua può essere definito studiando l'equilibrio tra le forze che favoriscono la mobilitazione e quelle che tendono ad opporvisi.

La relazione di equilibrio adottata per il tratto di alveo del T.Pora che si estende dal ponte di via Sagittario (sez.21-sez.20) fino alla foce (sez.1) si esprime nella seguente forma proposta dalla FHWA (*Federal Highway Administration*) - *Design of Roadside Channels with Flexible Linings - Hydraulic Engineering Circular Number 15, Third Edition:*

$$\tau_e = \tau_p$$

dove:

τ_e (*Effective Shear Stress*) rappresenta la sollecitazione tangenziale sul rivestimento erboso, per azione della corrente, funzione sia delle caratteristiche del suolo sottostante che della vegetazione stessa (azione motrice della corrente). La tensione tangenziale esercitata dalla corrente si basa quindi sulla

sollecitazione tangenziale al terreno in combinazione con la protezione offerta dalla vegetazione in alveo, se presente, secondo la formula:

$$\tau_e = \tau_d(1 - C_f)\left(\frac{n_s}{n}\right)^2$$

dove:

τ_d = tensione tangenziale al fondo di progetto (N/m^2),

Cf = coefficiente che tiene conto della copertura erbosa (*grass cover factor*),

ns = scabrezza del suolo (*soil grain roughness*),

n = scabrezza complessiva (*overall lining roughness*).

Il coefficiente *Cf* viene stimato mediante i valori di riferimento proposti dalla FHWA e riportati nella tabella a seguire:

Tabella 1: Cover Factor Values for Uniform Stands of Grass -FHWA

Growth Form	Cover Factor, Cf				
	Excellent	Very Good	Good	Fair	Poor
Sod	0.98	0.95	0.9	0.84	0.75
Bunch	0.55	0.53	0.5	0.47	0.41
Mixed	0.82	0.79	0.75	0.7	0.62

Il valore del coefficiente ns viene stimato, se D_{75}>1.3mm, secondo la formula:

$$n_s = \alpha(D_{75})^{1/6}$$

dove:

α = fattore di conversione pari a 0.015 (SI),

D_{75} = diametro corrispondente al 75% del passante (in peso) del campione di materiale d'alveo esaminato.

Il valore di *ns* è definito pari a 0.016 qualora il D_{75}< 1.3mm.

τ_p *(permissible shear stress on the vegetative lining)* rappresenta il valore della sollecitazione tangenziale critica per il rivestimento erboso presente in alveo. Il valore di τ_p è funzione sia delle proprietà dei terreni coesivi che costituiscono il materiale d'alveo che delle caratteristiche della vegetazione presente in alveo (azione resistente al moto). Le formule a seguire consentono di calcolare il valore di τ_p:

$$\tau_{p,soil} = \left(C_1 PI^2 + C_2 PI + C_3\right)\left(C_4 + C_5 e\right)^2 C_6$$

$$\tau_p = \frac{\tau_{p,soil}}{(1 - C_f)}\left(\frac{n}{n_s}\right)^2$$

dove:

$\tau_{p\ soil}$ = tensione tangenziale critica al suolo,

PI = indice di plasticità dei terreni,

e= indice dei vuoti,

C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6 = coefficienti definiti mediante la tabella a seguire.

Tabella 2: Coefficients for Permissible Soil Shear Stress (USDA, 1987) -FHWA

Coefficients for Permissible Soil Shear Stress (USDA, 1987)								
ASTM Soil Classification	**Applicable Range**	**c_1**	**c_2**	**c_3**	**c_4**	**c_5**	**c_6 (SI)**	**c_6 (CU)**
GM	10≤PI≤20	1.07	14.3	47.7	1.42	-0.61	$4.8x10^{-3}$	10^-4
	20≤PI	-	-	0.076	1.42	-0.61	48	1
GC	10≤PI≤20	0.0477	2.86	42.9	1.42	-0.61	$4.8x10^{-2}$	10^-3
	20≤PI	-	-	0.119	1.42	-0.61	48	1
SM	10≤PI≤20	1.07	7.15	11.9	1.42	-0.61	$4.8x10^{-3}$	10^-3
	20≤PI	-	-	0.058	1.42	-0.61	48	1
SC	10≤PI≤20	1.07	14.3	47.7	1.42	-0.61	$4.8x10^{-3}$	10^-4
	20≤PI	-	-	0.076	1.42	-0.61	48	1
ML	10≤PI≤20	1.07	7.15	11.9	1.48	-0.57	$4.8x10^{-3}$	10^-4
	20≤PI	-	-	0.058	1.48	-0.57	48	1
CL	10≤PI≤20	1.07	14.3	47.7	1.48	-0.57	$4.8x10^{-3}$	10^-4
	20≤PI	-	-	0.076	1.48	-0.57	48	1
MH	10≤PI≤20	0.0477	1.43	10.7	1.38	-0.373	$4.8x10^{-2}$	10^-3
	20≤PI	-	-	0.058	1.38	-0.373	48	1
CH	20≤PI	-	-	0.097	1.38	-0.373	48	1

Il confronto dei valori di τ_e e τ_p consente di definire se il tratto di alveo in esame è soggetto a possibili fenomeni di erosione ($\tau_e > \tau_p$) oppure la tendenza evolutiva del corso d'acqua è quella di lasciar depositare il materiale d'alveo ($\tau_e < \tau_p$).

7.2. Applicazione al tronco terminale del Pora

La caratterizzazione sedimentologica dell'alveo del torrente Pora è stata ricavata mediante l'utilizzo del campionamento di materiale dal letto fluviale avvenuto in corrispondenza della sezione 25 che, per caratteristiche del materiale, può essere considerata rappresentativa dell'intero corso d'acqua (vedi *paragr.2.3*).

In generale si osserva che il materiale che costituisce il fondo alveo è caratterizzato da granulometrie grossolane di tipo ciottoloso-ghiaioso debolmente sabbioso.

L'analisi delle tendenze evolutive nel tratto di torrente compreso tra le sez.23-sez.1, oggetto del presente progetto preliminare di 1° stralcio, è stata condotta applicando a ciascuna sezione di calcolo del corso d'acqua, inserita nel modello idraulico secondo la configurazione di progetto prevista, la relazione di equilibrio tra la forza motrice della corrente in alveo e l'azione resistente al moto secondo la metodologia proposta da FHWA, in relazione ad un evento di piena duecentennale. A seguire si riportano i valori dei coefficienti adottati per il calcolo:

D_{75} = 27.5 mm

Cf = 0.8

ns = 0.0261

PI= 15

e = 0.47

ASTM Soil Classification = GM (ghiaie limose, miscele limo ghiaia).

L'analisi dell'assetto di progetto mostra una prevalente tendenza erosiva ($\tau_e > \tau_p$) lungo l'intero tratto del T.Pora compreso tra il ponte di via Sagittario e la foce, ad eccezione del tratto compreso tra le sez.8-sez.6, in corrispondenza del ponte di attraversamento RFI, lungo le quali l'azione motrice esercitata dalla corrente risulta inferiore all'azione resistente del materiale d'alveo e del ricoprimento erboso considerato. In ragione dei risultati ottenuti si è deciso pertanto, cautelativamente, di differenziare i valori di scabrezza lungo l'alveo nell'intervallo compreso tra Ks = 31 $m^{1/3}/s$ per il tratto a prevalente tendenza al deposito (sez.8-sez.6) e Ks ~ 34$m^{1/3}/s$ per i tratti con prevalente tendenza erosiva.

7.3. Analisi in moto bidimensionale a fondo mobile - configurazione di 1 stralcio

La configurazione relativa alla realizzazione della soluzione definitiva degli interventi di 1 stralcio, nel tratto terminale del T.Pora, è stata implementata nel modello di calcolo bidimensionale a fondo mobile. Le quote di fondo alveo in corrispondenza della sezione alla foce (sez.1) sono state inserite nel modello di calcolo considerando, cautelativamente, l'eventuale presenza di quantità di materiale di deposito - barra di foce-, che potrebbe quindi ridurre la sezione utile di deflusso.

In ipotesi di fondo mobile, le simulazioni hanno preso in esame gli eventi con tempo di ritorno pari a 50 e 200 anni, considerando per il diametro dei sedimenti in alveo, il valore di 15 mm, che corrisponde al d_{50} della curva granulometrica. Si è assunto per il livello in mare, in entrambe le simulazioni, un valore costante pari a 0.0 m s.m.m..

La Tabella 3 riporta i risultati della verifica idraulica condotta relativa all'evento 200-ennale, in corrispondenza di alcune sezioni di calcolo di interesse, in termini di quote idrometriche massime e di quote del fondo. Queste ultime sono valutate sia all'istante finale della simulazione, per evidenziare le variazioni prodotte dall'evento, sia come inviluppo dei valori minimi e massimi raggiunti nel corso della simulazione, per evidenziare le altezze massime di erosione e di deposito che si possono ottenere nel corso dell'evento stesso.

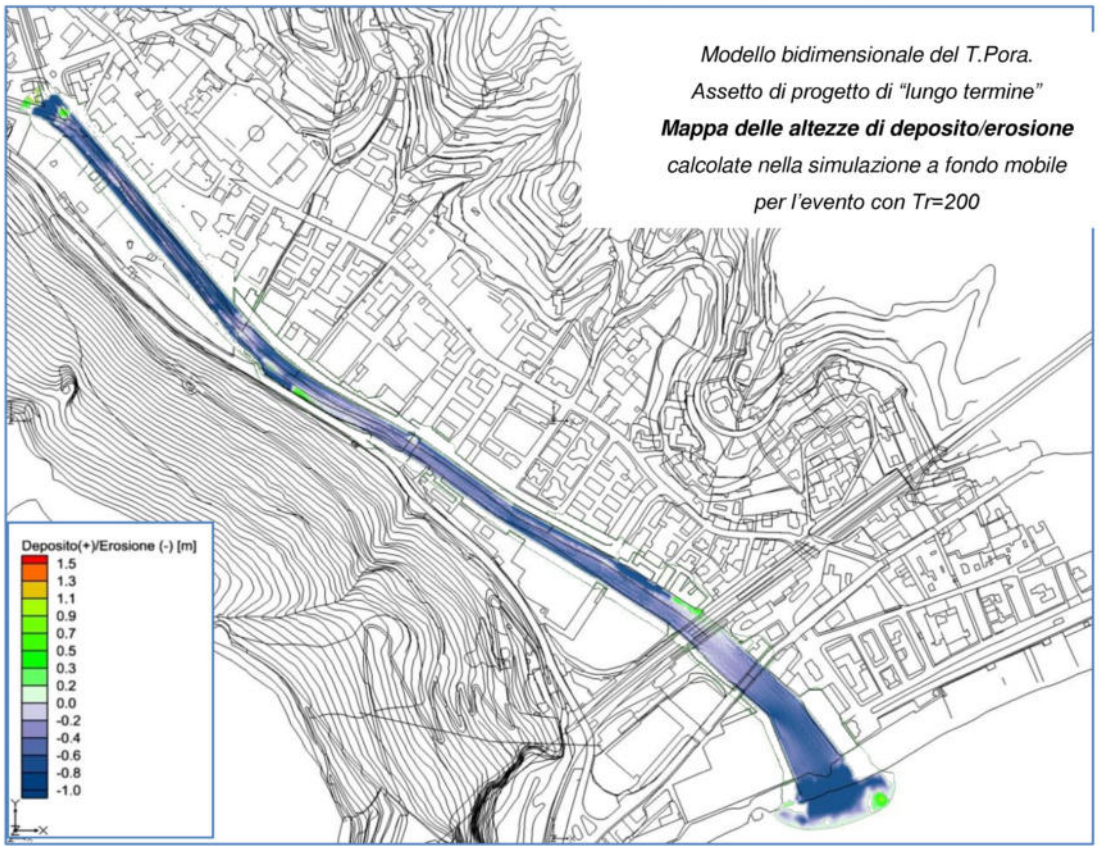
Tabella 3: Profilo delle quote del fondo e delle quote del pelo libero calcolate con il modello bidimensionale nella simulazione dell'evento con Tr=200 anni in ipotesi di fondo mobile (d=15 mm).

Sezione	Quota difese [m]	H fondo iniziale [m]	Hfondo finale [m]	Hfondo max [m]	Hfondo min. [m]	Quota pelo libero max [m]	Franco min. [m]
21	7.78	2.31	1.98	2.44	1.98	6.52	1.26
16	6.6	1.61	1.11	1.61	1.11	5.39	1.21
13	6.53	1.3	0.7	1.3	0.7	4.87	1.66
8	5	0.25	-0.125	0.47	-0.1	3.31	1.69
6	5	0.17	-0.27	0.315	-0.29	2.84	2.16
3	4	0.06	-0.78	0.06	-0.78	1.9	2.1

La Figura 16 riporta in forma grafica i risultati calcolo delle simulazioni relative all'evento duecentennale in termini di tendenze evolutive delle quote del fondo alveo. Queste ultime vengono riportate all'istante finale della simulazione, per evidenziare le altezze massime di erosione e di deposito che si possono ottenere al termine dell'evento stesso. Si evidenzia come, in relazione alla

natura dell'analisi, i risultati delle simulazioni debbano essere assunti quali rappresentativi delle tendenze evolutive e degli ordini di grandezza delle modificazioni morfologiche attese. Inoltre si evidenzia come, anche solo in termini qualitativi, i risultati non possono assumersi attendibili nel tronco posto immediatamente a valle della sezione di confluenza.

Figura 16: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo mobile – Mappa delle altezze di deposito/erosione calcolate per gli eventi con tempo di ritorno paria 200 (d=15mm)

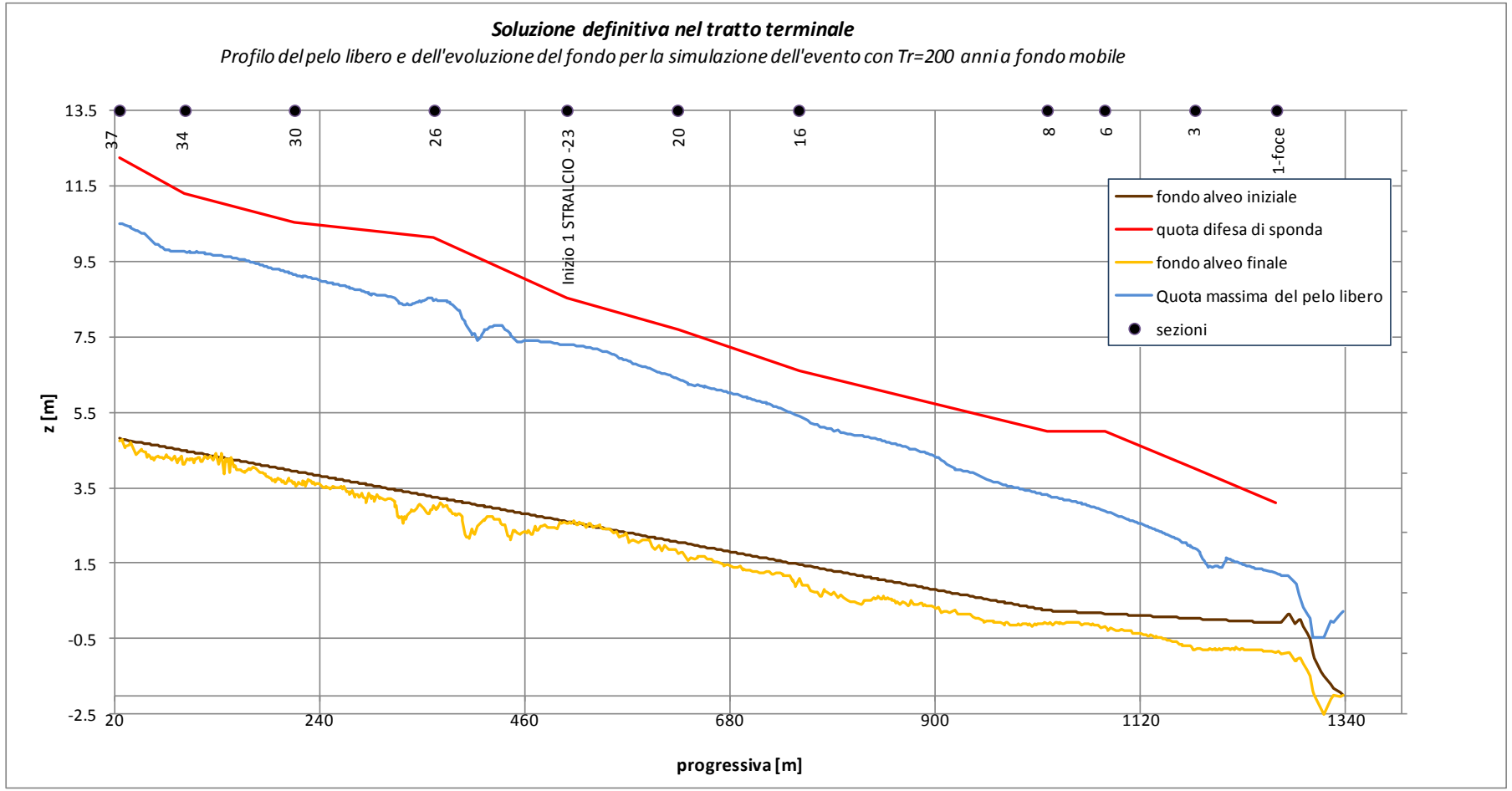


Osservando i risultati ottenuti, sia in forma grafica che tabellare, emerge che lungo il tratto terminale del T.Pora oggetto di intervento le velocità della corrente, durante l'evento piena considerato, sono tali da rendere il tratto sostanzialmente in erosione.

Dal confronto della Figura 17 con il grafico di Figura 10, che si riferisce al calcolo a fondo fisso per il medesimo evento di piena (Tr=200anni), si nota immediatamente come l'ipotesi di fondo mobile porti a quote idrometriche massime apprezzabilmente inferiori e, quindi, ad un incremento del franco minimo rispetto alla quota delle difese di sponda. In questo caso, infatti, la dinamica del trasporto solido al fondo modifica la geometria della sezione del corso d'acqua con un effetto che, nel suo

complesso, produce una riduzione delle resistenze al moto. Tendenzialmente in erosione è anche il tratto di foce, a valle della sezione 5, ove la corrente tende ad accelerare prima dello sbocco in mare.

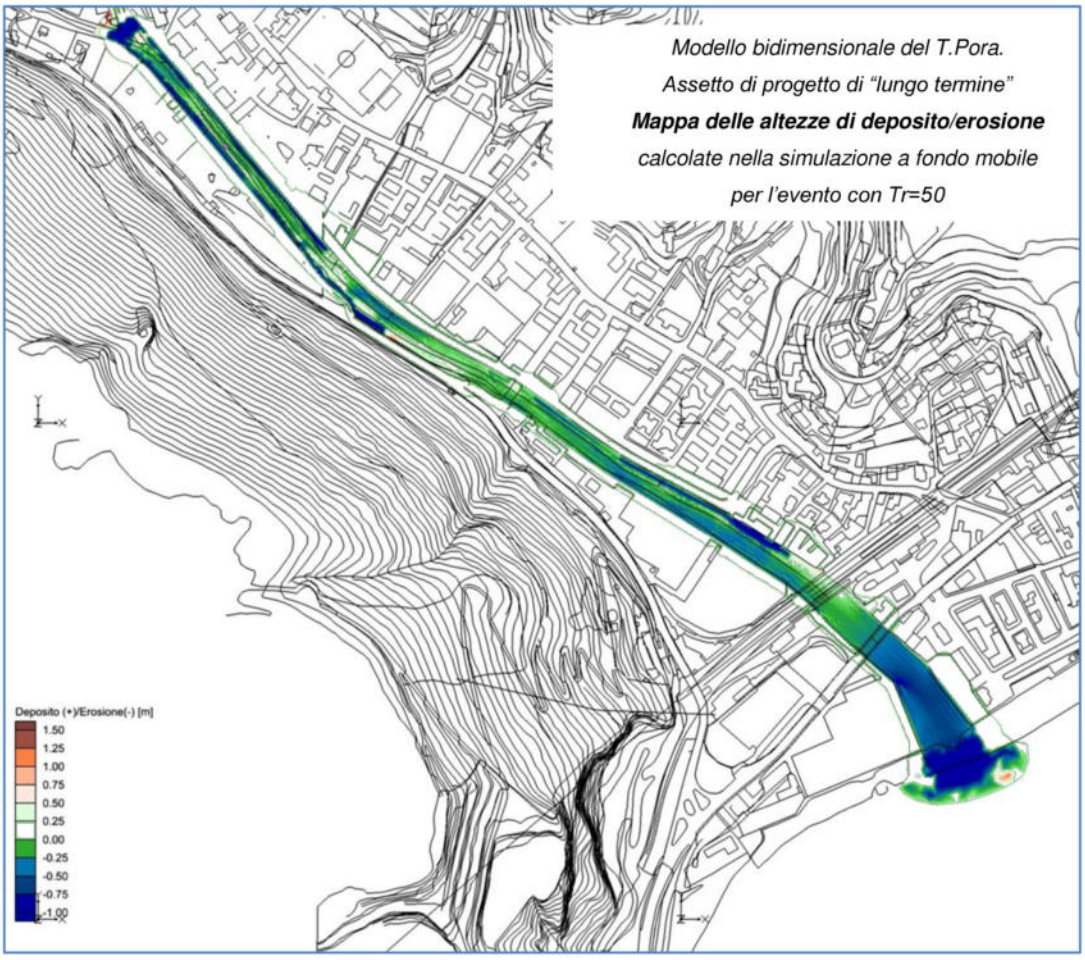
Figura 17: Simulazione dell'evento Tr=200 anni nell'ipotesi di fondo mobile (d=15mm).



L'analisi della capacità di trasporto potenziale e delle tendenze evolutive del T. Pora, in relazione all'evento 50-ennale, non ha evidenziato sostanziali modifiche rispetto a quanto illustrato in relazione all'evento 200-ennale se non per alcune situazioni localizzate e di minore entità.

La Figura 18 riporta in forma grafica i risultati del calcolo in termini di quote del fondo. Queste ultime vengono riportate all'istante finale della simulazione, per evidenziare le altezze massime di erosione e di deposito che si possono ottenere al termine dell'evento stesso. Dall'immagine appare evidente che, anche in relazione ad un evento di piena50-ennale, come rimanga prevalente la tendenza erosiva lungo torrentizio tutto il tronco terminale del Pora.

Figura 18: Modello bidimensionale del T Pora in ipotesi di fondo mobile – Mappa delle altezze di deposito/erosione calcolate per gli eventi con tempo di ritorno paria 50 (d=15mm)



8. INDIRIZZI PER LA MANUTENZIONE DELL'ALVEO E DELLE OPERE DI DIFESA

L'obiettivo di un programma di monitoraggio e manutenzione è principalmente quello di fornire uno strumento che consenta di pianificare gli interventi necessari al mantenimento nel tempo delle condizioni di sicurezza idraulica.

Il *piano di monitoraggio e manutenzione dell'alveo* dovrà perseguire l'obiettivo di:

- definire le azioni di monitoraggio da programmare allo scopo di acquisire periodicamente le necessarie informazioni in merito alla naturale evoluzione del corso d'acqua, onde evitare che, in assenza di controllo e di manutenzione, si abbia negli anni una diminuzione dell'officiosità idraulica per effetto di possibili modificazioni della geometria delle sezioni di deflusso generate da fenomeni di deposito/erosione;
- definire le azioni di monitoraggio da prevedersi a seguito di eventi di piena di particolare intensità;
- segnalare la necessità, ai fini del mantenimento delle condizioni di sicurezza sopra richiamate, di operazioni di rimozione e sfalcio della vegetazione presente in alveo, di interventi periodici di asportazione materiale o di risagomatura delle sezioni di deflusso;
- fornire indicazione in merito agli interventi di manutenzione da attuarsi sulle opere di difesa idraulica.

8.1.1. Manutenzione dell'alveo

Le valutazioni effettuate in merito alle problematiche di trasporto solido hanno evidenziato una maggiore tendenza al deposito in corrispondenza del tratto posto a cavallo del nuovo ponte RFI (sez.8-sez.6) contestualmente ad un evento di piena di elevato tempo di ritorno (Tr=200 anni). Da tali considerazioni si rileva pertanto la necessità di periodici interventi di asportazione del materiale depositato (specialmente a seguito di eventi di piena significativi) onde garantire il mantenimento della massima officiosità idraulica in particolare proprio in corrispondenza delle suddette sezioni di deflusso.

Lungo l'intero tratto del T.Pora, oggetto di studio, è necessario seguire un programma di monitoraggio, la cui finalità sia quella di definire una procedura ripercorribile che consenta di stabilire dove e quando sia necessario procedere con operazioni di disalveo per il mantenimento delle condizioni di sicurezza

assunte in sede di pianificazione. Il monitoraggio sistematico consente l'applicazione di un programma di manutenzione che limita gli interventi di movimentazione ed estrazione del materiale solido solo ai casi di effettiva necessità.

Il monitoraggio potrà essere eseguito assumendo quali sezioni di controllo quelle di riferimento del presente studio, le quali dovranno essere oggetto di rilievo topografico ogni cinque anni e comunque dopo ogni evento di piena significativo: dalle risultanze di tali rilievi sarà possibile determinare se esistono i presupposti per programmare interventi di asportazione di materiale d'alveo.

Si evidenzia infatti come un innalzamento generalizzato del fondo medio del corso d'acqua si tradurrebbe in un incremento di livelli idrici di piena con una conseguente riduzione dei franchi di sicurezza. Nei tratti in cui questi ultimi risultano prossimi al valore minimo di riferimento (0.5 m) è chiaro che un sovralluvionamento generalizzato risulterebbe incompatibile, in termini di sicurezza, con quanto assunto in sede di pianificazione.

Qualora le verifiche topografiche puntuali sopra illustrate mostrino un livello medio di fondo sensibilmente superiore rispetto alla configurazione di progetto, si dovrà effettuare una campagna di rilievo su il tratto di interesse.

Nel caso in cui le analisi così effettuate confermino un innalzamento/abbassamento generalizzato dell'assetto di fondo, si dovrà programmare l'intervento che consenta il ripristino della configurazione di progetto.

Al fine di minimizzare possibili errori di compensazione di rilievo, si segnala la necessità di fissare, a partire dalla prima verifica topografica, i punti fiduciari per ciascuna sezione trasversale: tali punti costituiranno i riferimenti per le successive campagne di verifica.

8.1.2. Opere di difesa idraulica

Il programma di monitoraggio prevede altresì il controllo visivo delle opere di difesa idraulica (muri di sponda) per verificare il loro stato di manutenzione a fronte di eventuali fenomeni di ammaloramento, scalzamento al piede, ecc….. La verifica periodica di tali opere verrà effettuata a cadenza annuale ed a seguito di ogni evento di piena significativo.

Nelle tabelle di seguito riportate vengono indicati i principali interventi di manutenzione da eseguirsi sul corso d'acqua e sulle opere di difesa allo scopo di mantenere l'alveo e le opere in buono stato,

garantendo la stabilità nel tempo dell'intervento di sistemazione ed il permanere, quindi, di idonee condizioni di sicurezza idraulica.

Dal punto di vista della priorità di intervento sarà opportuno dare la precedenza alle operazioni di manutenzione volte al raggiungimento dell'assetto di progetto nei casi in cui la situazione attuale presenti una configurazione "non idonea" mentre risulteranno meno prioritari gli interventi di semplice mantenimento della situazione già in essere.

PROGRAMMA DI MANUTENZIONE - ALVEO

Opera oggetto di manutenzione	*Risorse necessarie per l'intervento manutentivo*	*Anomalie riscontrabili*	*Interventi di Manutenzione*
Alveo del corso d'acqua	Attrezzi d'uso comune Operai con DPI Mezzi meccanici per movimenti terra	- Alterazione delle sezioni di deflusso per erosione del fondo o delle sponde, o per formazione di depositi - Presenza di depositi di materiale vegetale o litoide in alveo - Presenza di materiale improprio in alveo (rifiuti, materiale da discarica)	- ripristino della sezione d'alveo con eliminazione dei materiali litoidi ostacolanti o parzializzanti il regolare deflusso - rimozione di rifiuti solidi e taglio di vegetazione arbustiva ed arborea nell'alveo, ostacolo al deflusso regolare delle piene ricorrenti - ripristino della sezione di deflusso in corrispondenza dei ponti, tramite: rimozione dei tronchi d'albero e di altro materiale che costituisca ostruzione, rimozione di depositi alluvionali che ostacolino il regolare deflusso.

PROGRAMMA DI MANUTENZIONE - OPERE DI DIFESA IDRAULICA

Opera oggetto di manutenzione	*Risorse necessarie per l'intervento manutentivo*	*Anomalie riscontrabili*	*Interventi di Manutenzione*
Argini	Sfalciatrice	Crolli ed erosioni localizzate, fessurazioni con creazione di vie preferenziali di deflusso.	Sfalcio d'erba. Controlli visivi.
Muri di difesa in cls	Attrezzi d'uso comune, impalcature, trabattelli. Operai con DPI.	Ammaloramento cls Scalzamento al piede Distacchi rivestimento in pietrame del paramento Infiltrazioni	Interventi di ripristino cls Ripristino protezione al piede con massi di cava Manutenzione rivestimento in pietrame

9. ALLEGATO A: STATO DI PROGETTO - SEZIONI TRASVERSALI