





<u>RUP:</u> Dott. Ing. GIANLUCA ZANICHELLI	
<u>ATI:</u> MANDATARIA	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">             STUDIO PAOLETTI         </div> <div style="text-align: center;">             Certification            ISO 9001         </div> <div style="text-align: center;">           20133 MILANO – via Edoardo Bassini, 23            tel. 0226681264 fax 0226681553            E-Mail: etatec@etatec.it         </div> <div style="text-align: right;">           Dott. Ing. STEFANO CROCI            Geom. LUCA FILIPPUCCI         </div> </div>
<u>GEOLOGIA:</u>	<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">           Dott. Geol. GIOVANNI SAVAZZI         </div> <div style="text-align: center;">           27040 MEZZANINO – via Marconi, 32/U            tel. 3393221989            E-Mail: info@studiosavazzi.it         </div> <div style="text-align: right;">           Dott. Geol. GIOVANNI SAVAZZI         </div> </div>

	NOME	FIRMA	DATA
REDAZIONE	S. Croci		
VERIFICA	S. Croci		
APPROVAZIONE	S. Croci		
TITOLO <b>RELAZIONE IDRAULICA</b>			
Revisioni	N°	Descrizione	Data
	1		
	2		
	3		
Numero elaborato	TIPOLOGIA PE	COMMESSA 250–61	DOCUMENTO AT
		NUMERO A-2	Scala

## INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. RACCOLTA DATI .....	3
2.1 DATI DESUNTI DAL PAI – PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO .....	3
2.2 DATI DESUNTI DAL PGRA – PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI.....	4
3. IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE .....	7
3.1 PREMESSA .....	7
3.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO .....	7
3.2.1 Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno .....	7
4. ANALISI IDRAULICHE.....	12
4.1 EVENTO DI PIENA CON T=200 ANNI.....	12
5. CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA IN PROGETTO.....	15

## **1. PREMESSA**

La presente relazione riporta i calcoli di dimensionamento idraulico della scogliera di protezione della sponda destra del fiume Trebbia oggetto del presente progetto.

Di seguito sono elencate le attività effettuate dagli scriventi nell'ambito della stesura della presente relazione, che vengono descritte nei successivi capitoli:

1. raccolta dati e informazioni idrologico-idrauliche del fiume Trebbia nel tratto di interesse; (capitolo 2);
2. implementazione del modello idraulico bidimensionale del fiume Trebbia (capitolo 3);
3. effettuazione di analisi idrauliche, con il modello di cui al 2., per la definizione delle caratteristiche della corrente fluviale in condizioni di piena, utili al dimensionamento delle opere di difesa spondali oggetto del presente progetto (capitolo 4);
4. calcoli di dimensionamento della scogliera in progetto (capitolo 5).

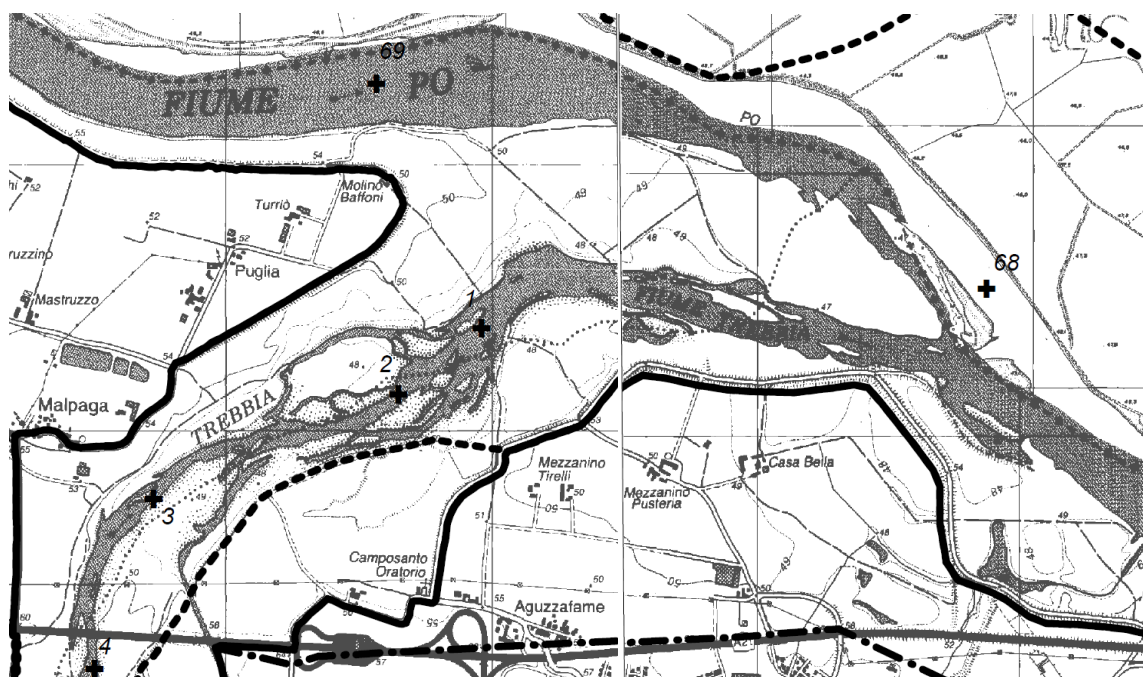
## 2. RACCOLTA DATI

### 2.1 DATI DESUNTI DAL PAI – PIANO ASSETTO IDROGEOLOGICO

Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Bacino del Fiume Po (PAI), adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino con Deliberazione n. 18 del 26 aprile 2001, è stato approvato con DPCM del 24 maggio 2001.

Obiettivo prioritario del PAI è la riduzione del rischio idrogeologico entro valori compatibili con gli usi del suolo in atto, in modo tale da salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni ai beni esposti.

Il PAI, riguardo alla pericolosità e al rischio di alluvioni, contiene nell'Elaborato 8 la delimitazione delle fasce fluviali (Fascia A, Fascia B, Fascia B di progetto e Fascia C) dell'asta del Po e dei suoi principali affluenti, tra cui il F. Trebbia. Il tratto di fiume interessato dall'intervento in progetto è situato a valle della sezione del PAI n. 1.



**Figura 1 – Estratto cartografico delle fasce fluviali del fiume Trebbia nell'intorno dell'intervento in progetto**

Nella Direttiva n. 2 del PAI, relativa alla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica, sono riportati i valori di portata e i corrispondenti profili di piena sui corsi d'acqua interessati dalla delimitazione delle fasce fluviali. Nelle

figure seguenti sono riportate le tabelle relative al fiume Trebbia.

**Tabella 22:** portate di piena per il fiume Trebbia

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie km <sup>2</sup>	Q20 m <sup>3</sup> /s	Q100 m <sup>3</sup> /s	Q200 m <sup>3</sup> /s	Q500 m <sup>3</sup> /s	Idrometro Denominazione
		Progr.( km)	Cod.	Denomin.						
Trebbia	Trebbia	94.684	30	Rivergaro	931	2190	2770	3020	3350	
Trebbia	Trebbia	117.060	3	Confluenza in Po	982	2200	2800	3050	3400	

**Figura 2 –“Tab. 22: portate di piena per il fiume Trebbia (fonte: PAI)**

**Tabella 66:** profilo di piena per il fiume Trebbia

Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni		Sez.	Progr. (km)	T = 200 anni	
		Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)			Quota idrometrica (m s.m.)	Q (m <sup>3</sup> /s)
030	94.684	139.30	3020	020	102.637	108.39		010	111.407	68.81	
029	95.193	137.63		019	103.285	104.83		009	112.433	65.14	
028	95.719	135.66		018	104.186	99.97		008	113.288	62.76	
027	95.988	134.49		017	105.158	95.05		007	114.548	61.06	
026	96.712	131.02		016	105.936	91.68		006	115.387	60.08	
025	97.853	125.63		015	106.699	88.27		005	115.430	59.57	
024	98.551	123.61		014	107.687	83.36		004	116.412	54.41	
023	100.176	118.92		013	108.827	78.27		003	117.060	52.83	3050
022	101.206	115.50		012	109.686	74.57		002	118.129	49.87	
021	101.951	112.45		011	110.292	72.37		001	118.498	49.66	

**Figura 3 –“Tab. 66: profilo di piena per il fiume Ticino (fonte: PAI)**

In particolare, per il tratto di interesse la portata di piena duecentennale è pari a 3'050 m<sup>3</sup>/s, mentre il livello idrico della piena duecentennale è pari a 49.66 m s.m..

## 2.2 DATI DESUNTI DAL PGRA – PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO DI ALLUVIONI

Il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), predisposto in attuazione del D.lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva 2007/60/CE (cosiddetta “Direttiva Alluvioni”), è stato adottato con deliberazione 17 dicembre 2015 n. 4, approvato con Deliberazione 3 marzo 2016, n. 2 dal Comitato Istituzionale dell’Autorità di bacino del fiume Po e successivamente con DPCM 27 ottobre 2016 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 30 del 6 febbraio 2017).

Il Piano ha come finalità quella di ridurre le conseguenze negative derivanti dalle alluvioni per la salute umana, il territorio, i beni, l’ambiente, il patrimonio culturale e le attività

economiche e sociali.

A tal fine nel Piano vengono individuate le aree potenzialmente esposte a pericolosità per alluvioni, stimato il grado di rischio al quale sono esposti gli elementi che ricadono entro tali aree “allagabili”, individuate le “Aree a Rischio Significativo (ARS)” e impostate misure per ridurre il rischio medesimo, suddivise in misure di prevenzione, protezione, preparazione, ritorno alla normalità ed analisi, da attuarsi in maniera integrata.

Con riferimento al fiume Trebbia, nella successiva Figura 4 sono riportate le aree di pericolosità definite nel PGRA.

Nella Figura 5 sono riportati i valori delle portate di piena di riferimento per diversi valori del tempo di ritorno, desunte dal documento “*Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale*” del PGRA, mentre nella Figura 6 sono riportate le quote idriche della piena duecentennale del F. Trebbia.

In particolare, per il tratto di interesse del presente studio, la portata di piena duecentennale è pari a 2'690 m<sup>3</sup>/s, inferiore rispetto a quanto definito nel PAI. Il valore riportato nel PGRA è da considerarsi un aggiornamento rispetto a quanto definito nel PAI.

Il livello idrico della piena duecentennale è pari a 48.87 m s.m., anch'esso inferiore a quanto definito nel PAI.



**Figura 4 – carta della pericolosità da alluvione del PGRA del F. Trebbia nei pressi di Piacenza (blu: pericolosità frequente; azzurro scuro: pericolosità poco frequente; azzurro chiaro: pericolosità rara)**

**Tab. 4.28: portate di piena per il fiume Trebbia**

Bacino	Corso d'acqua	Sezione			Superficie	Q20	Q200	Q500	Idrometro
		Progr. (km)	Cod.	Denomin.	km²	m³/s	m³/s	m³/s	Denominazione
Trebbia	Trebbia	66.856	73	Bobbio	683	1600	2570	2960	Trebbia a Bobbio
Trebbia	Trebbia	82.612	43	Perino (valle confl. Perino)	840	1670	2700	3120	
Trebbia	Trebbia	93.902	31	Rivergaro (Ponte di Statto)	912	1670	2700	3120	Trebbia a Rivergaro
Trebbia	Trebbia	115.631	5	Piacenza (Ponte SS9)	964	1670	2690	3110	

**Figura 5 – estratto “Tab. 4.28: portate di piena per i corsi d'acqua principali del bacino del Trebbia (fonte: PGRA)”**

**Tab. 5.57: profili di piena per il fiume Trebbia**

Sez.	Progr. (km)	T = 20 anni	T = 200 anni	T = 500 anni	Sez.	Progr. (km)	T = 20 anni	T = 200 anni	T = 500 anni
		Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)			Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)	Quota idrica (m s.m.)
74	66.647	261.85	263.10	263.63	36	89.244	156.91	157.57	157.84
73	66.856	260.90	262.58	263.29	35	90.663	152.23	153.27	153.60
72	67.065	259.48	260.12	260.27	34	91.347	148.70	149.85	150.28
71	67.376	258.61	259.64	259.85	33	92.139	146.00	147.09	147.46
70	67.936	256.22	257.30	258.05	32	93.254	142.49	143.36	143.67
69	68.521	253.00	253.96	254.42	31	93.902	139.77	140.63	140.92
67	69.692	247.16	248.05	248.53	30	94.684	136.47	137.35	137.68
66	70.373	244.27	245.86	247.06	29	95.174	134.47	135.26	135.49
65	71.165	241.22	242.46	243.39	28	95.606	133.07	134.20	134.60
64	71.429	240.29	241.70	242.89	27	95.918	131.69	132.64	132.97
63	72.225	237.46	240.13	241.96	26	96.671	128.67	129.40	129.65
62	72.723	236.01	239.75	241.71	25	97.784	124.27	124.88	125.08
61	73.220	231.68	231.96	232.22	24	98.556	121.59	122.16	122.36
60	73.668	230.06	231.49	232.55	23	100.119	116.52	117.10	117.31
59	74.089	228.49	230.79	232.02	22	101.089	113.40	113.86	114.02
58	74.563	226.36	227.13	227.46	21	101.810	110.67	111.12	111.27
57	74.800	224.73	225.70	226.08	20	102.529	107.12	107.56	107.71
55	75.668	220.84	221.48	221.79	19	103.173	103.66	104.10	104.27
54	76.231	218.42	219.02	219.30	18	104.037	99.07	99.50	99.64
53	77.055	214.71	215.73	216.23	17	105.032	93.44	93.84	93.99
52	77.562	213.13	214.47	215.01	16	105.801	90.60	91.03	91.19
51	78.193	211.27	212.58	213.12	15	106.716	87.09	87.57	87.74
50	79.031	207.69	208.95	209.46	14	107.718	82.62	83.04	83.20
49	79.789	203.38	204.45	204.94	13	108.979	76.83	77.35	77.54
48	80.223	202.10	203.77	204.39	12	109.758	73.06	73.56	73.74
47	80.317	201.79	203.50	204.13	11	110.350	70.38	70.92	71.12
46	80.738	199.59	201.11	201.68	10	111.496	66.82	67.46	67.67
45	81.302	194.02	195.32	195.83	9	112.376	64.28	64.82	65.02
43	81.564	192.76	193.85	194.36	8	113.325	61.99	62.52	62.70
43	82.612	187.66	188.53	188.82	7	114.602	59.45	60.01	60.20
42	83.308	184.91	185.62	185.87	5	115.631	56.22	56.82	57.04
41	84.478	179.40	180.06	180.30	4_01	115.632	53.82	54.63	54.91
40	85.520	174.50	175.11	175.33	4	116.527	52.50	53.14	53.37
39	86.503	169.48	170.19	170.44	3	117.131	51.08	51.67	51.89
38	87.583	164.39	165.03	165.25	2	118.194	49.13	49.91	50.16
37	88.274	161.10	161.74	161.96	1	118.570	48.28	48.87	49.08

**Figura 6 – estratto “Tab. 5.57: profilo di piena per il fiume Trebbia” (fonte: PGRA)”**

### **3. IMPLEMENTAZIONE DI UN MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE**

#### **3.1 PREMESSA**

A partire dai rilievi disponibili, costituiti dal DTM della regione fluviale del Trebbia effettuato da AIPo nel 2021, integrato da rilievo batimetrico in corrispondenza della foce effettuato a febbraio 2024 e dal DTM del fiume Po dell'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po (Lidar e batimetria fondo alveo - 2005) e dalle principali grandezze idrauliche di riferimento riportate nel PGRA, è stato implementato un modello idraulico bidimensionale a fondo fisso dell'intero tratto di fiume Trebbia oggetto dello studio generale, che si estende da Rivergaro fino alla confluenza in Po. La lunghezza complessiva del modello lungo l'asse fluviale è pari a circa 26 km.

#### **3.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE A FONDO FISSO**

##### **3.2.1 Ipotesi di calcolo e condizioni al contorno**

Sulla base dei dati topografici e delle informazioni idrologico-idrauliche disponibili per il tratto fluviale di indagine si è proceduto all'implementazione di un modello di simulazione idraulica bidimensionale di dettaglio del fiume Trebbia che, opportunamente calibrato con le informazioni disponibili, ha permesso di analizzare, ad un'opportuna scala di riferimento, l'evoluzione delle dinamiche fluviali relative all'assetto attuale del corso d'acqua.

La modellazione idraulica a fondo fisso è stata implementata mediante il programma di calcolo INFOWORKS 2D ICM di Innovyze, che permette di analizzare il campo di moto a partire da un D.T.M. (Digital Terrain Model), rappresentativo della geometria del dominio di calcolo, basandosi sulla risoluzione di tre equazioni non lineari alle differenze finite per la determinazione del campo di moto della corrente su di un piano bidimensionale (x, y).

Due di queste sono le equazioni del moto nelle direzioni x e y; la terza equazione è data dalla legge di continuità che garantisce la conservazione della massa all'interno del dominio di calcolo.

Il modello viene rappresentato attraverso una griglia di elementi triangolari. Le tre equazioni vengono risolte in ciascun nodo della maglia di calcolo; il metodo di calcolo delle suddette equazioni è sviluppato attraverso una procedura di risoluzione iterativa per la minimizzazione dello scarto della soluzione stessa.

In questo modo il modello calcola la velocità in ogni nodo mediandola sul tirante idrico, ovvero senza tenere conto della variazione della velocità nella direzione  $z$ .

Per minimizzare i possibili errori numerici nella soluzione, a causa di scarti nel calcolo dell'equazione di conservazione di massa, è possibile infittire localmente la maglia di calcolo per limitare tali effetti di diffusione numerica e fornire risultati di maggiore dettaglio.

Le equazioni di base, impiegate per simulare il moto bidimensionale indotto dalla piena di riferimento nell'area in studio, sono affette da alcune approssimazioni. Innanzitutto, le due equazioni del moto lungo le direzioni  $x$  e  $y$  si basano sull'ipotesi che la corrente sia lineare e che quindi la pressione abbia una distribuzione verticale idrostatica.

A livello geometrico la dimensione della maglia, se non sufficientemente piccola, può generare effetti di instabilità al momento in cui un elemento passa dalla condizione di completa immersione ad un parziale asciugamento. Il modello considera appartenente al campo di moto solo gli elementi in cui tutti i nodi presentano un tirante maggiore di zero.

Tuttavia, un eccessivo infittimento della dimensione delle celle, specialmente in zone in cui si prevede che il deflusso delle acque possa avere caratteristiche mediamente regolari e non particolarmente complesse, è tale da generare un appesantimento del calcolo con incremento della durata della simulazione stessa senza che vengano forniti ulteriori utili dettagli.

La corretta scelta della risoluzione delle maglie di calcolo, nelle diverse porzioni costituenti il dominio della modellazione, è quindi un aspetto particolarmente delicato per poter fornire le necessarie informazioni circa la dinamica fluviale.

Un'altra importante approssimazione del modello di calcolo risiede nella formula adottata per la resistenza idraulica del fondo, che viene fatta dipendere dal quadrato del modulo della velocità e dal coefficiente di scabrezza di Manning supposto localmente noto. Se sulla prima dipendenza non ci sono particolari dubbi, dato il carattere turbolento della corrente, sulla dipendenza da un valore costante del coefficiente di Manning esistono non poche incertezze, specialmente per le profondità minori e in presenza di trasporto di materiale solido. In questo caso il problema risulta molto attenuato dalla presenza in alveo di tiranti idrici mediamente elevati.

Il modello bidimensionale di dettaglio del fiume Ticino è stato implementato per un'estensione longitudinale lungo l'asse pari a circa 26 km, comprendente l'intera larghezza dell'alveo di piena. La superficie del dominio di calcolo del modello idraulico è pari a circa 32 kmq, e siccome il numero delle celle di calcolo è pari a circa 840'000, si ha che la superficie media degli elementi di calcolo è pari a circa 40 mq.

Il modello bidimensionale a fondo fisso è stato utilizzato per simulare l'evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni, il cui valore della portata di piena al colmo è pari a circa 2'700 m<sup>3</sup>/s (fonte: PGRA);

Come condizione al contorno di valle, da porre in corrispondenza della sezione terminale del modello, rappresentata dalla confluenza in Po, è stata considerata la scala di deflusso presso l'idrometro di Piacenza, avendo inserito in Po a monte della confluenza una portata pari a 1'000 m<sup>3</sup>/s in modo da ridurre l'effetto di rigurgito in Trebbia, che comporterebbe una riduzione della velocità della corrente nel tratto fluviale interessato dall'opera di protezione spondale in progetto e quindi una sottostima delle condizioni idrauliche di dimensionamento e verifica della stessa.

Nella Figura 7 è riportata l'estensione del dominio di calcolo del modello bidimensionale, mentre nella Figura 8 è riportato un dettaglio della magliatura del modello nei pressi della sponda oggetto in progetto.

Come parametri di scabrezza si è assunto per l'alveo un valore del coefficiente di Strickler pari a 28 m<sup>1/3</sup>/s, mentre per le aree golenali esterne all'alveo inciso è stato utilizzato un valore pari a 15 m<sup>1/3</sup>/s.



**Figura 7 – estensione del dominio di calcolo del modello bidimensionale del fiume Trebbia, da Rivergaro al Po**



**Figura 8 – dettaglio della magliatura di calcolo del modello bidimensionale del fiume Trebbia nei pressi del tratto di intervento a monte della confluenza in Po**

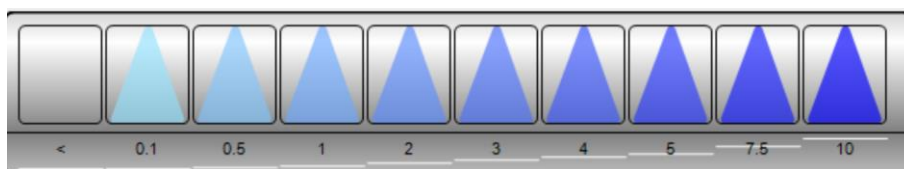
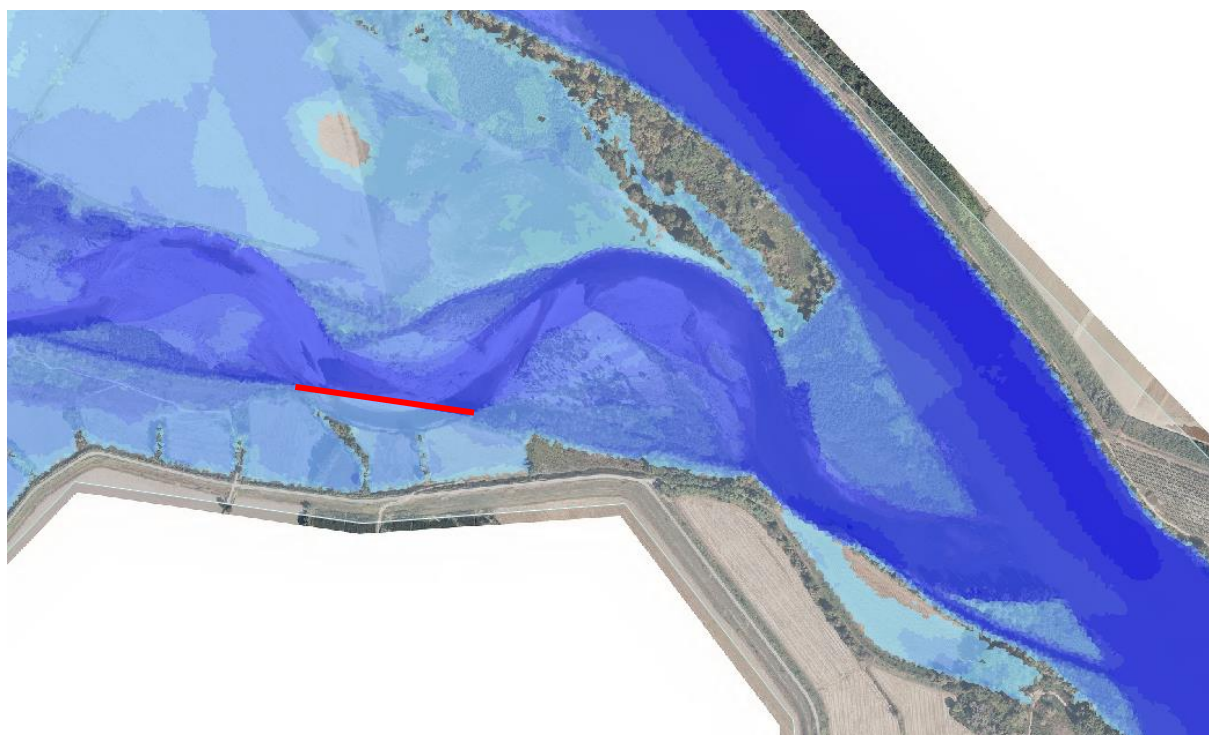
## 4. ANALISI IDRAULICHE

Nel presente capitolo vengono descritte le analisi idrauliche, effettuate con l'ausilio del modello bidimensionale descritto nel capitolo precedente, finalizzate alla valutazione delle grandezze idrauliche necessarie per il corretto dimensionamento delle opere di protezione spondale.

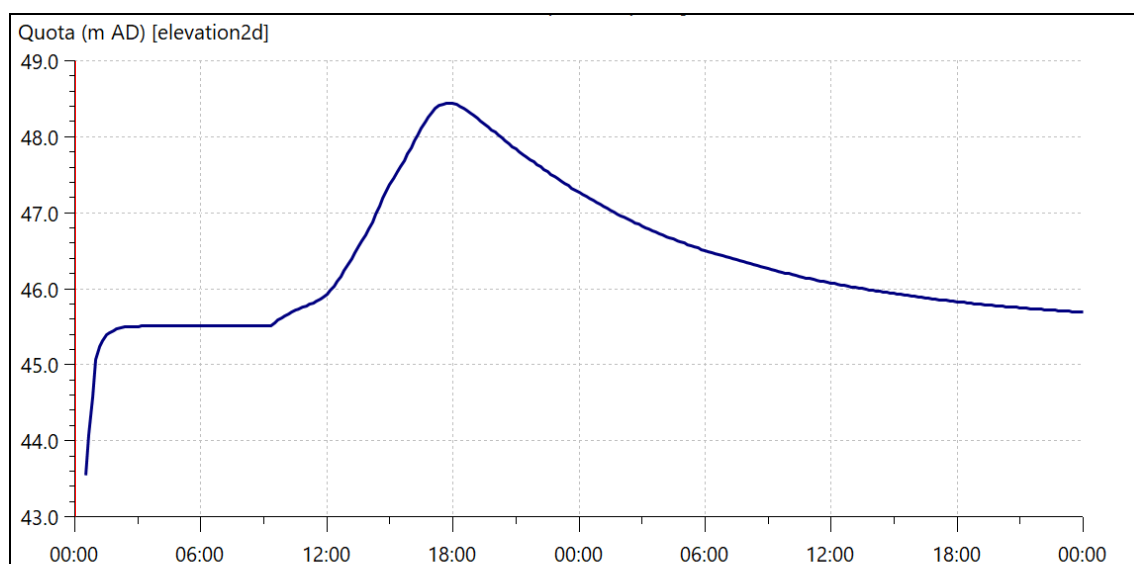
### 4.1 EVENTO DI PIENA CON $T=200$ ANNI

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati della simulazione condotta con riferimento ad un evento di piena caratterizzato da un tempo di ritorno pari a 200 anni (portata al colmo pari a circa  $2'700 \text{ m}^3/\text{s}$ ). In particolare:

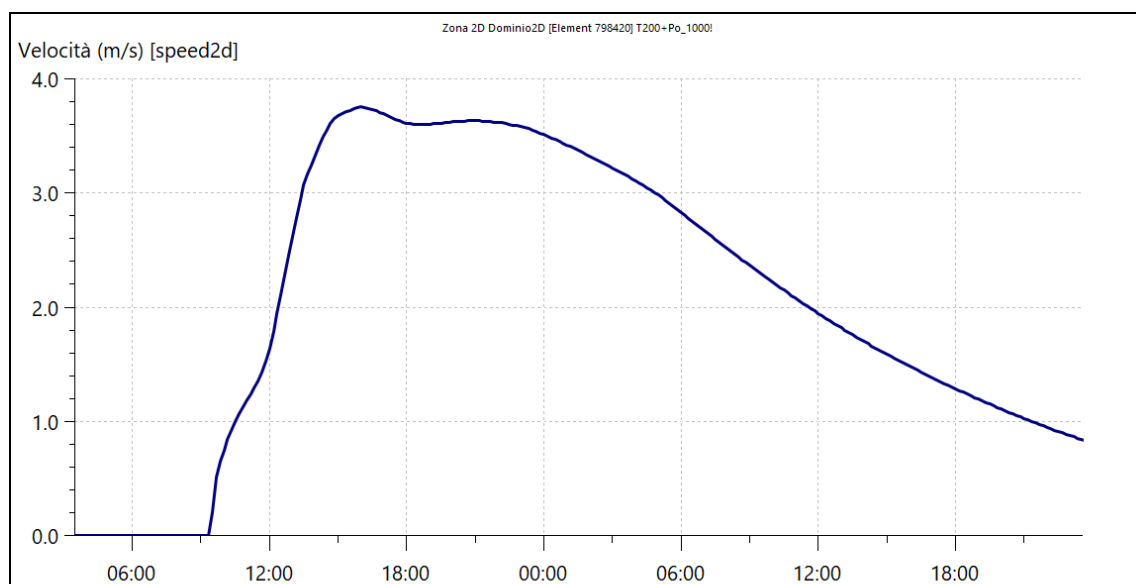
- Nella Figura 9 sono riportati tiranti idrici nella zona di intervento;
- Nella Figura 10 è riportato l'andamento del livello idrico in corrispondenza della scogliera in progetto, espresso in m s.m.;
- nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato l'andamento della velocità della corrente in corrispondenza della scogliera in progetto, espressa in m/s.



**Figura 9 – risultati del modello 2D –assetto di progetto per T=200 anni: tiranti idrici espressi in m (la linea rossa rappresenta la soglieria in progetto)**



**Figura 10 – risultati del modello 2D – assetto di progetto per T=200 anni: livello idrico in corrispondenza della soglieria in progetto**



**Figura 11 – risultati del modello 2D – assetto di progetto per T=200 anni: velocità della corrente in corrispondenza della scogliera in progetto**

## 5. CALCOLI DI DIMENSIONAMENTO DELLA SCOGLIERA IN PROGETTO

Il presente progetto prevede il consolidamento di un tratto di sponda destra del fiume Trebbia, attualmente in erosione, attraverso la realizzazione di una scogliera in massi. Di seguito di riporta le analisi condotte per definire il diametro minimo dei massi da utilizzare per il rinforzo della sponda.

Dall'analisi dei risultati ottenuti con l'applicazione del modello bidimensionale del fiume Trebbia, si ha che in corrispondenza della sponda destra dove è prevista la realizzazione della scogliera la velocità della corrente in occasione di un evento di piena duecentennale è pari a circa 4 m/s, mentre il tirante idrico è pari a circa 6.5 m (48.5 m s.m. – 42.0 m s.m.).

Il calcolo di verifica della stabilità consiste nel verificare le condizioni d'equilibrio del materiale costituente le sponde. Stevens et al. (1976), a seguito di accurata analisi dei momenti delle forze agenti sull'elemento solido, giunsero alle seguenti espressioni utili per la determinazione del diametro d'equilibrio su sponda inclinata, e quindi per la valutazione dell'opportunità, o meno, di realizzare opere di consolidamento spondale.

$$\sigma = \frac{21\tau}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma-1}\right)\gamma d_m} = \frac{0,30u_f^2}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma-1}\right)gd_m} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{\cos \lambda}{\frac{2 \sin \theta}{\sigma \tan \phi} + \sin \lambda} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{1 + \sin(\lambda + \beta)}{2} \quad (3)$$

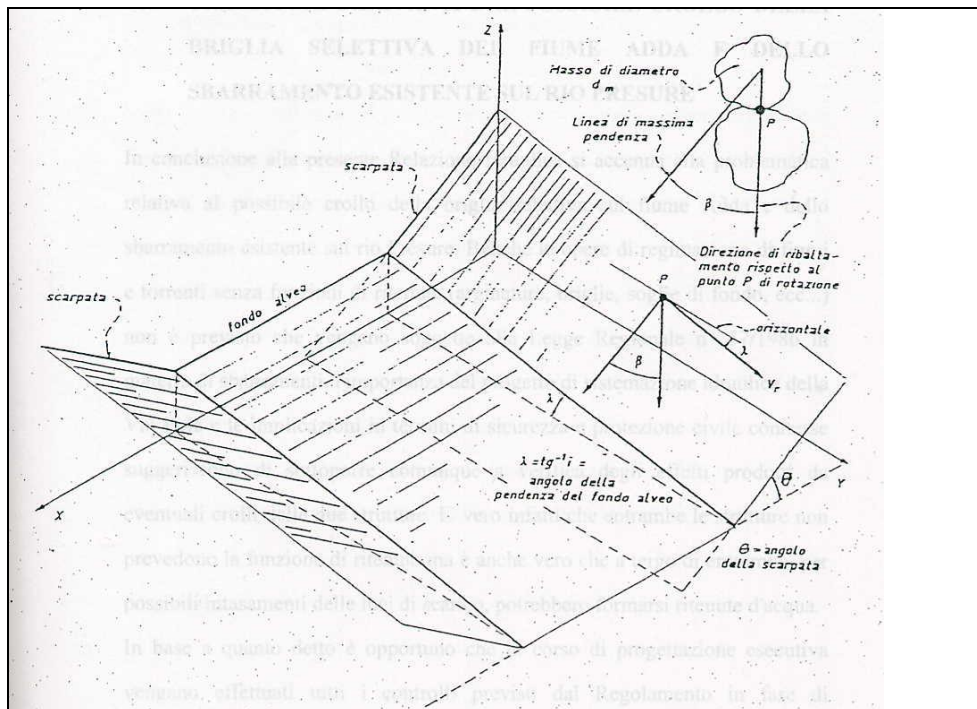
$$C_s = \frac{\cos \theta \tan \phi}{\sigma' \tan \phi + \sin \theta \cos \beta} \quad (4)$$

in cui:

- $d_m$  è il diametro del masso;
- $C_s$  è il coefficiente di sicurezza al ribaltamento del masso rispetto al punto P di rotazione (rapporto tra il momento risultante delle forze stabilizzanti e il momento risultante delle forze ribaltanti);
- $\theta$  è la pendenza adottata per la scarpata;
- $\phi$  è l'angolo di riposo in acqua dei massi, pari a 45°;
- $\beta$  è l'angolo che la direzione di caduta del masso forma con la linea di massima pendenza

della scarpata;

- $\lambda$  è l'angolo diedro tra il piano orizzontale e il piano inclinato costituente il fondo dell'alveo ( $\tan \lambda = i =$  pendenza del fondo);
- $\sigma$  e  $\sigma'$  sono i cosiddetti numeri di stabilità del masso rispettivamente su sponda inclinata ed orizzontale ( $\Theta = 0$ );
- $\tau$  è l'azione di trascinamento sul masso;
- $u_T$  è la velocità della corrente contro il masso.



In definitiva le espressioni precedenti consentono di verificare la stabilità di una sponda. Dati infatti la dimensione  $d_m$  dei massi, l'angolo di scarpata  $\theta$ , l'angolo di riposo  $\phi$ , calcolata la velocità  $u_T$  e la sua direzione, applicando in successione le prime quattro equazioni si giunge a calcolare il coefficiente di sicurezza  $C_s$ . Se questo è maggiore di 1, la scogliera ha sufficiente stabilità; se  $C_s = 1$ , l'equilibrio è al limite; se  $C_s < 1$ , la scogliera è soggetta a franamento.

Per una buona sicurezza è auspicabile che  $C_s$  sia almeno pari a 1,2.

Nel caso in esame sono stati considerati in primo luogo i seguenti parametri:

- altezza della corrente: 6.5 m;
- velocità media della corrente: 4 m/s;

- pendenza della sponda: 1 su 2 (h:b);
- pendenza fondo alveo: 0.1%;
- peso specifico dei massi: 2'400 kg/m<sup>3</sup>

Considerando di utilizzare per la formazione della scogliera massi di peso minimo pari a circa 1'000-2'000 kg, a cui corrisponde un diametro equivalente pari a 0.9-1.2 m, si ha che dall'applicazione delle suddette formule emerge che il coefficiente di sicurezza risulta essere pari a 1.35-1.46, che è maggiore del valore minimo richiesto pari a 1.2.

Milano, giugno 2024

Dott. Ing. Stefano Croci