



Comune di Modigliana
Provincia di Forlì-Cesena

**Lavori di sistemazione idraulica in alveo e di manutenzione del centro di
 potabilizzazione di Campatello**

Progetto definitivo-esecutivo

Il tecnico incaricato:



Job: 11245

Progetto

ing. Franco Torre

Gruppo di lavoro

dott. Beppe Patrizi (coordinamento, modello idraulico,
 paesaggio)

geom. Paolo Abbate

geom. Luigi Peronespolo

geom. Nabil Khouchouche (rilievi topografici e grafica)

ing. Andrea Barbieri (vulnerabilità sismica e calcoli c. a.)

p. i. Mattia Betti (connessioni elettriche e dati)

dott. for. Paolo Rigoni (piano abbattimento alberi)

ing. Cesare Guardigli (CSP)

geom. Nicolò Di Dio (grafica)

Il Committente:

dott. Tonino Bernabè

Presidente

di

ROMAGNA ACQUE Società delle Fonti S.p.a.

E04 – Studio idraulico

E04

| Revisioni | <i>n.</i> | <i>Descrizione</i> | <i>Data</i> |
|-----------|-----------|--------------------|----------------|
| | | 0 | emissione |
| | 1 | Revisione | Settembre 2022 |
| | 2 | | |
| | 3 | | |
| Scala: | 4 | | |
| | 5 | | |

Indice

| | |
|--|----|
| 1. SCOPO DEL LAVORO..... | 5 |
| 2. RIFERIMENTI METODOLOGICI | 5 |
| 3. MODELLO DI SIMULAZIONE DELLA PORTATA | 7 |
| 4. SIMULAZIONI | 9 |
| 5. EFFETTI ALL'ALTEZZA DEL SEDIMENTATORE | 13 |
| 6. EFFETTI ALL'ALTEZZA DELL'IDROMETRO RADAR..... | 15 |
| 7. ASSETTO DEL FONDO DELL'ALVEO | 17 |
| 8. IDROMETROGRAFO A MONTE DELLA PRESA | 20 |
| 9. SOGLIA IN ALVEO E PROTEZIONE DELLE RIVE | 20 |
| 10. BIBLIOGRAFIA | 20 |

1. SCOPO DEL LAVORO

Le attività che vengono descritte nel seguito derivano dalla necessità di Romagna Acque di migliorare la gestione dell'impianto di Campatello (comune di Modigliana) sotto il profilo idraulico e impiantistico.

In particolare, il progetto prevede:

- 1) l'installazione di un nuovo idrometrografo a monte dell'impianto, la definizione della corrispondente sezione idraulica e la taratura della sezione per la stima delle portate;
- 2) la sostituzione dell'idrometrografo presso l'opera di presa;
- 3) la sistemazione e protezione delle rive a monte di 1) per dare stabilità alla sezione idrografica.

Oltre a questo, lo studio è finalizzato anche a stimare l'altezza idrometrica corrispondente alle portate critiche con ritorno fino a 200 anni, necessarie per progettare la sistemazione idraulica e la quota di installazione dell'idrometro.

2. RIFERIMENTI METODOLOGICI

Lo studio idraulico è stato realizzato mediante la predisposizione di uno strumento modellistico di tipo numerico, attraverso il quale è stato possibile eseguire diverse simulazioni con altrettanti regimi di portata ottenendo, per ciascun caso, la stima delle velocità di flusso, dei volumi in transito e dei tiranti.

Il sistema utilizzato per eseguire le simulazioni è Flomod (Froelich, 1989) nella versione Windows realizzata presso Servin; si tratta di un sistema che risolve in due dimensioni le equazioni del moto in acque basse con un metodo del tipo depth-averaged, che considera, cioè, una distribuzione assegnata del moto lungo la verticale per ridurre il problema alle due dimensioni.

Molto brevemente, le equazioni che descrivono il flusso dell'acqua in due dimensioni sono (Froelich, 1989):

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} u \, dz \quad V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{z_w} v \, dz$$

con H = profondità dell'acqua, z_b = elevazione del fondo, $z_w = z_b + H$ = elevazione della superficie dell'acqua, U e V le velocità rispettivamente secondo gli assi x e y , orientati parallelamente alla superficie libera dell'acqua. Dalle equazioni precedenti si ottiene la distribuzione secondo l'asse z , che segue invece uno schema del tipo riportato nella seguente Fig. 1.

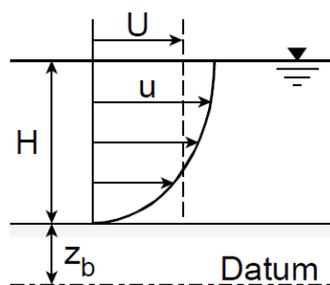


Fig. 1 – Velocità mediate in funzione della profondità (da: Froelich, 1989)

Le equazioni vengono confezionate con gli elementi finiti con il metodo di Galerkin, mentre la soluzione del sistema di equazioni avviene con il metodo frontale.

Per migliorare la capacità di fornire indicazioni utili in sede di progettazione dell'intervento, alla simulazione del flusso è stata associata una stima sommaria dell'erosione del fondo. L'applicazione è stata realizzata considerando solo alcuni aspetti della meccanica del trasporto solido in canali aperti con l'obiettivo di fornire qualche indicazione di larghezza massima, essendo praticamente improponibile effettuare la simulazione del trasporto solido in senso stretto, dato che le conoscenze sia idrauliche, sia sedimentarie del corso d'acqua sono praticamente inesistenti.

Trascurando, quindi, tutto ciò che concerne il trasporto solido in sospensione, ci si è limitati a valutare il rapporto tra la resistenza offerta dal fondo (forza passiva) e lo sforzo sul fondo dovuto alla corrente d'acqua (forza attiva). Lo sforzo sul fondo è dato dalla seguente relazione (Froelich, 1989):

$$\tau_b = \rho \frac{gn^2}{H^{1/3}} U_s^2$$

con ρ = densità dell'acqua, n = coefficiente di scabrezza di Manning, H = profondità dell'acqua e $U_s^2 = U^2 + V^2$ = velocità del flusso. Lo sforzo limite sul fondo è dato, invece, dalla nota relazione di Shields (1936):

$$\tau_c = \frac{\tau^*}{(\rho_s - \rho)gD}$$

con ρ_s la densità del sedimento, g la gravità e D il diametro dei granuli, normalmente fatto coincidere con il D_{50} . e τ^* = sforzo critico, deducibile dall'abaco di Shields (1936).

Froelich, per Flomod, applica invece la formula:

$$\tau_c = \tau_b \frac{n_{soil}^2}{n^2}$$

con n_{soil} = scabrosità del fondo e n = coefficiente di Manning.

Si tratta tuttavia di una condizione troppo rigida, per cui si è preferito optare per una forma più semplificata della medesima espressione:

$$\tau_c = \rho_s H i_s \frac{n_{soil}}{n}$$

con H per la profondità dell'acqua ed i_s per il gradiente del fondo.

Si considera, quindi, che il fondo dell'alveo sia erodibile quando lo sforzo attivo pareggia o supera (moto incipiente) la resistenza limite *ratio*:

$$ratio = \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right) \quad (1)$$

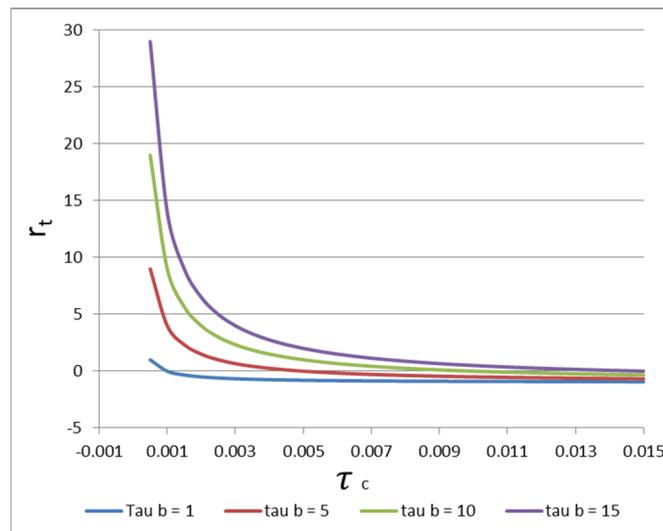


Fig. 2 $-(\tau_b - \tau_c)/\tau_c$ in funzione dell'altezza d'acqua e per alcuni valori assegnati di τ_b

e che l'erosione che ne può derivare è regolata da un coefficiente di erodibilità che può assumere una delle tante forme prospettate in letteratura (in Fig. 2. un esempio tratto da Patrizi, 2018).

In realtà, non esiste un metodo di tipo univocamente riconosciuto a livello scientifico internazionale per affrontare la stima della variazione del fondo (ϵ) e, in pratica, ciascun Autore tende a proporre uno stimatore adatto alla specifica circostanza. Nel caso in esame, si è fatto riferimento a quello proposto da Ariathurai & Arulanandan (1978, in Hayter & al., 1995) come segue:

$$\varepsilon = M \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right) \quad (2)$$

In cui M il coefficiente di erodibilità. Analogamente, non esiste uno stimatore per valutare l'accrescimento della quota del fondo che non sia espresso nei termini della concentrazione iniziale di sedimento nel fluido e della velocità di caduta (a sua volta derivata da una qualche forma dell'equazione di Stokes); un esempio, applicato in Patrizi (2018) ha una forma del tipo:

$$\varepsilon' = M' \left(\frac{v}{H} \right) \quad (3)$$

con v = velocità di flusso ed M' il coefficiente di sedimentazione..

In termini di conservazione della massa, Einstein & Krone (1962) hanno ipotizzato che la sedimentazione sia dipendente da una funzione di probabilità come segue:

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{P_d W_s C}{d}$$

In cui C è la concentrazione di sedimento, t il tempo, P_d la probabilità che il sedimento si depositi sul fondo, W_s la velocità di sedimentazione e d l'altezza d'acqua. La probabilità di sedimentazione viene ipotizzata con una funzione del tipo:

$$P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$$

in cui τ_{cd} è lo sforzo critico sul fondo. Se, da un lato, queste assunzioni semi-empiriche rendono possibile una qualche stima, dall'altro non va dimenticato che la simulazione del trasporto solido coinvolge meccanismi di dettaglio ben più complessi.

Il coefficiente di erodibilità M ed il coefficiente di sedimentazione M' , con queste premesse, assumono quindi il senso di fattori di scala attraverso i quali vengono considerati tutti gli effetti delle fenomenologie coinvolte e, in questo senso, possono essere utilizzate per avere una prima, anche se molto approssimata, valutazione delle intensità degli effetti del flusso.

3. MODELLO DI SIMULAZIONE DELLA PORTATA

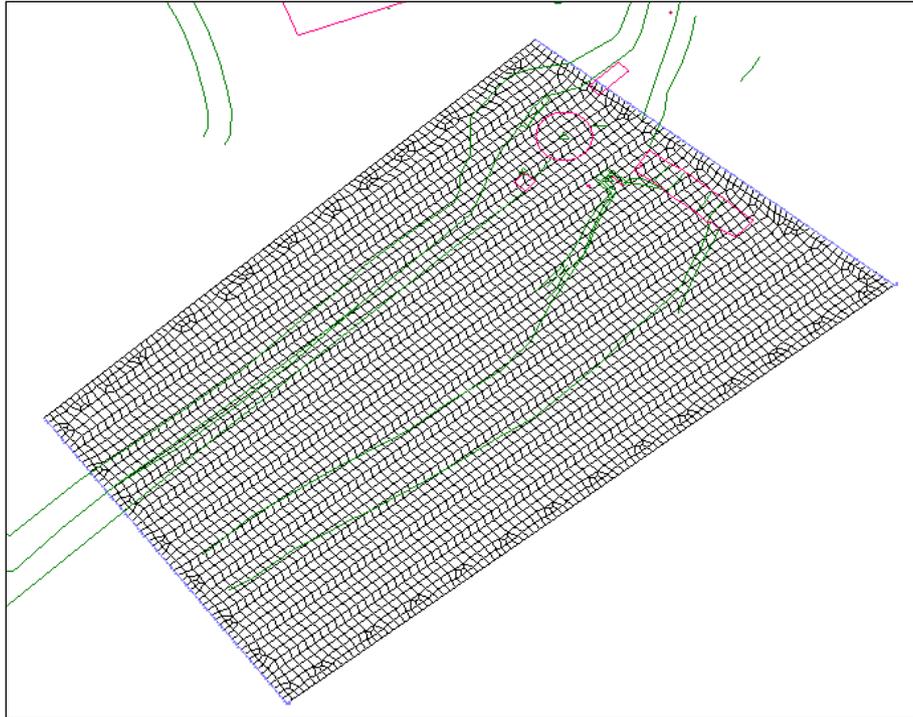
Metodologicamente, il sistema di equazioni viene scritto con gli elementi finiti e risolto con una variante approssimata del metodo frontale (Davis, 2004).

Il dominio di calcolo è stato identificato nel tratto del Tramazzo subito a monte della briglia che ospita l'opera di presa, per circa 110 – 120 m, ed è stato discretizzato con due schemi, entrambi basati su elementi quadrangolari a 8 nodi (4 nodi d'angolo, 4 a metà lato), aventi:

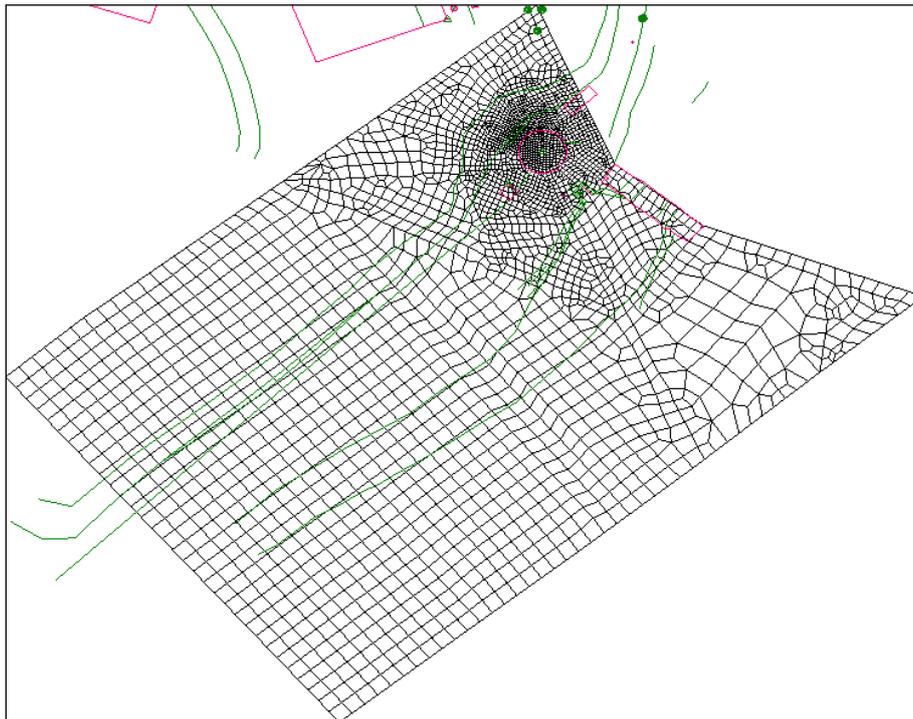
- l'uno, più ridotto di superficie, con 3,619 elementi e 14,799 nodi. La griglia sottende una superficie circa 6,800 m², il perimetro è di circa 343 m e la superficie media di 1 elemento è di circa 2.9 m², la minima di 0,45 m² (Fig. 3a);
- l'altro, più ampio, con circa 10,200 m² di superficie e un perimetro di circa 433 m, 2900 elementi e 11,800 nodi. La superficie media degli elementi è di 12 m², la minima di 0,02 m² (Fig. 3b).

L'uso di due geometrie diverse consente di verificare che i risultati delle simulazioni siano coerenti e che non subiscano deformazioni dovute, soprattutto, all'ampiezza della sezione trasversale utilizzata. Infatti, all'aumentare dell'ampiezza diminuisce la densità dei punti quotati disponibili (in particolare in destra idraulica) e le incertezze della morfologia si traducono in instabilità di calcolo e maggiori difficoltà a realizzare le simulazioni.

Il tempo è stato discretizzato con $t_0 = 0.0$, intervallo iniziale = 120 secondi, incremento 1.4 per passo, cicli di calcolo da 20 (3 giorni ca.) a 30 (65 giorni ca.) in modo che le simulazioni possono giungere all'equilibrio del flusso ($q_{monte} = q_{valle} = \text{costante}$), cosa che avviene in genere dai 10 cicli in poi.



(a)



(b)

Fig. 3 – Schemi di calcolo

Le condizioni al bordo sono: quota idrometrica imposta a valle e a monte (h_{monte} e h_{valle}), con h_{valle} variabile e gradienti compresi tra $5.00E^{-04}$ e $7.00E^{-04}$.

La scelta della condizione di monte sotto forma di altezza idrometrica, è stata preferita ad una condizione di flusso imposto (apparentemente più semplice e diretta) perché quest'ultima impedirebbe di controllare il gradiente idraulico e quindi renderebbe più difficile l'identificazione di soluzioni stabili.

In uscita si ottiene la stima del flusso in ingresso e uscita in condizioni di equilibrio, la stima delle velocità (direzione e intensità), l'elevazione e il tirante d'acqua nello spazio e nel tempo.

Per quello che riguarda i riferimenti e le stime note dei deflussi, le informazioni disponibili sono riportate nella seguente Tab. 1, in cui sono stati riportati i valori caratteristici delle principali sezioni di interesse nel bacino del Lamone e, in particolare, quelle a Sarna e a Rivalta. Quelle del Tramazzo sono disponibili a Tredozio, e da queste è stata stimata quella di Campatello (sia la Q_{30} che la Q_{200}).

La superficie sottesa alla sezione di Campatello, nei pressi dell'opera di presa, è di circa 41 km² ed è stata utilizzata per applicare i coefficienti unitari di deflusso riportati in tabella e ottenere quindi le due portate critiche di interesse.

| Bacino | Sezione | Area (km ²) | Q_{30}/km^2 | Q_{200}/km^2 | Q_{30} | Q_{200} |
|----------|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|----------|-----------|
| Lamone | Sarna | 260 | 1,04 | 1,04 | 364 | 537 |
| Marzeno | Rivalta | 360 | 1,3 | 1,3 | 314 | 463 |
| Tramazzo | Tredozio monte | 23,5 | 4,6 | 6,7 | 107,5 | 158,5 |
| Tramazzo | Tredozio valle | 36,5 | 3,7 | 5,4 | 133,5 | 196,9 |
| Tramazzo | Campatello | 41 | 3,7 | 5,4 | 151,7 | 221,4 |

Tab. 1 – Sezioni di deflusso disponibili a Sarna e a Rivalta e sezioni stimate sul Marzeno

4. SIMULAZIONI

Le simulazioni che sono state realizzate sono molte decine, ma di queste ne sono state utilizzate 15 (vedi Tab. 2), per sintetizzare i risultati ottenuti.

Le condizioni al bordo (Fig. 4) sono del tipo ad altezza imposta a monte e a valle (h_{valle} e h_{monte}), ma in grado di variare entro certi limiti. Le quote da imporre al bordo sono state trovate per tentativi e si sono concentrate in un intervallo di gradienti compresi tra 4 -4 e 7 10-4.

L'attrito (secondo Manning) è omogeneo con un valore standard di 0,035 (Chow, 1959). Si può valutare la possibilità di studiare una distribuzione disomogenea in base alle condizioni dell'alveo qualora siano disponibili due diverse morfologie distanti nel tempo. Al minimo, una volta realizzato il rivestimento del fondo, si potrà tenere conto quantomeno di questa nuova situazione.

Seguono alcune immagini, a titolo di esempio, riferite alla simulazione con h_{valle} (quota al bordo di valle presso la briglia) pari a 253.35 m slm, che corrisponde alla sommità del muretto di protezione del sedimentatore (simulazione 6).

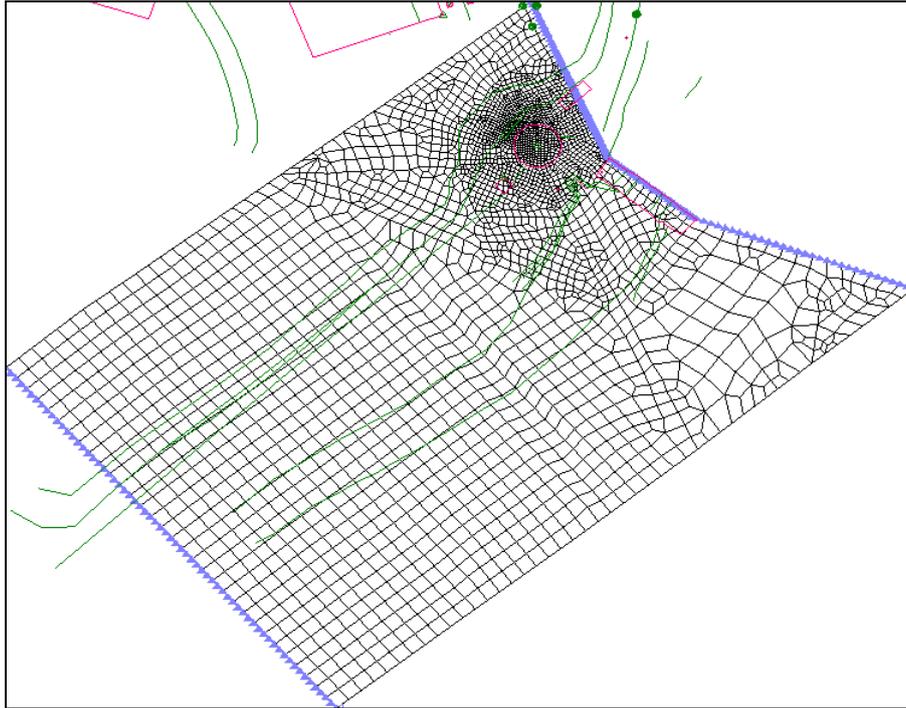


Fig. 4 – Geometria delle condizioni al bordo (simboli blu)

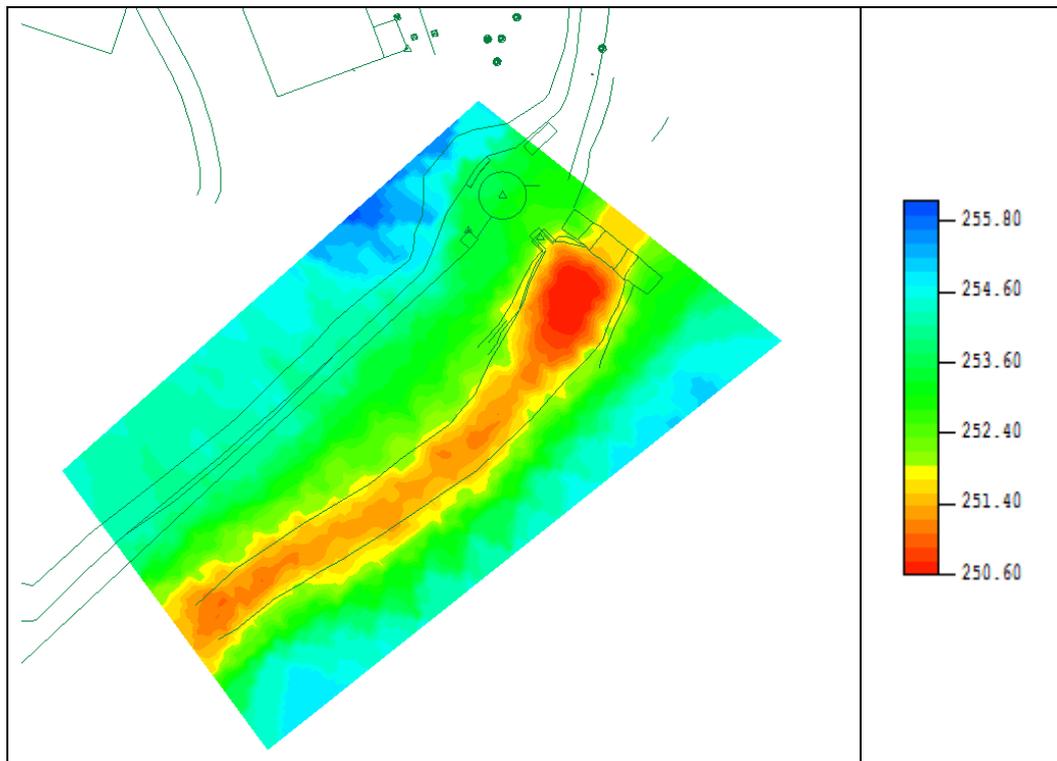


Fig. 5 - Morfologia dell'area (m slm)

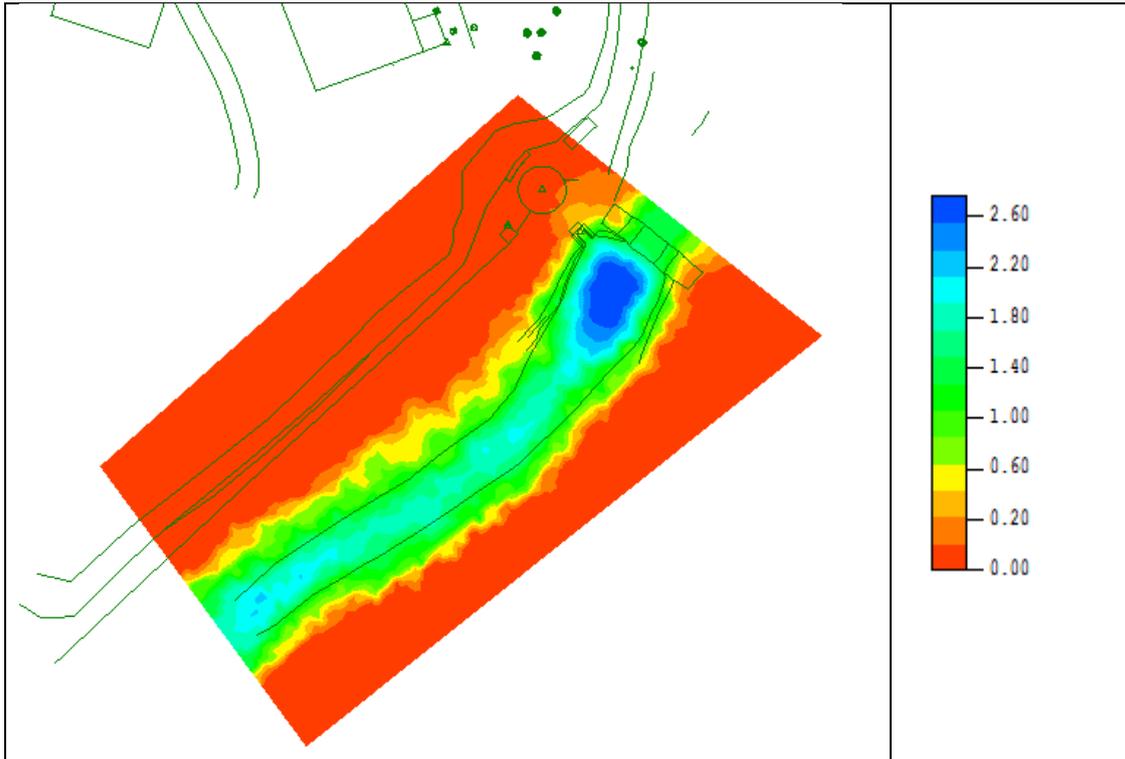


Fig. 6 - Tirante idrico all'equilibrio (m slm, simulazione 6). In rosso i valori nulli

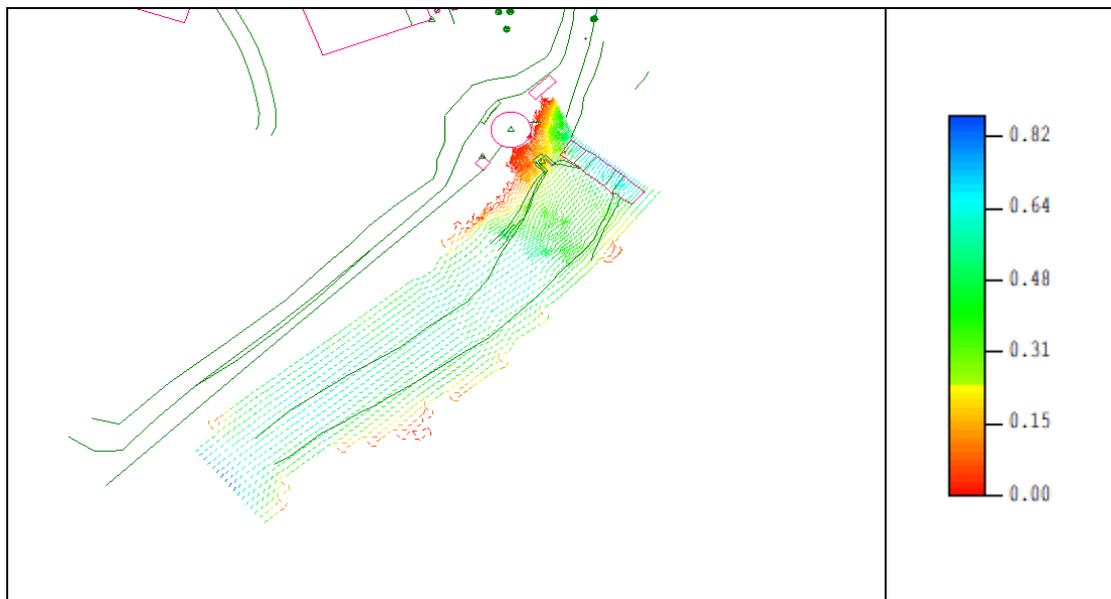


Fig. 7 – Velocità di flusso all'equilibrio (m/s, simulazione 6)

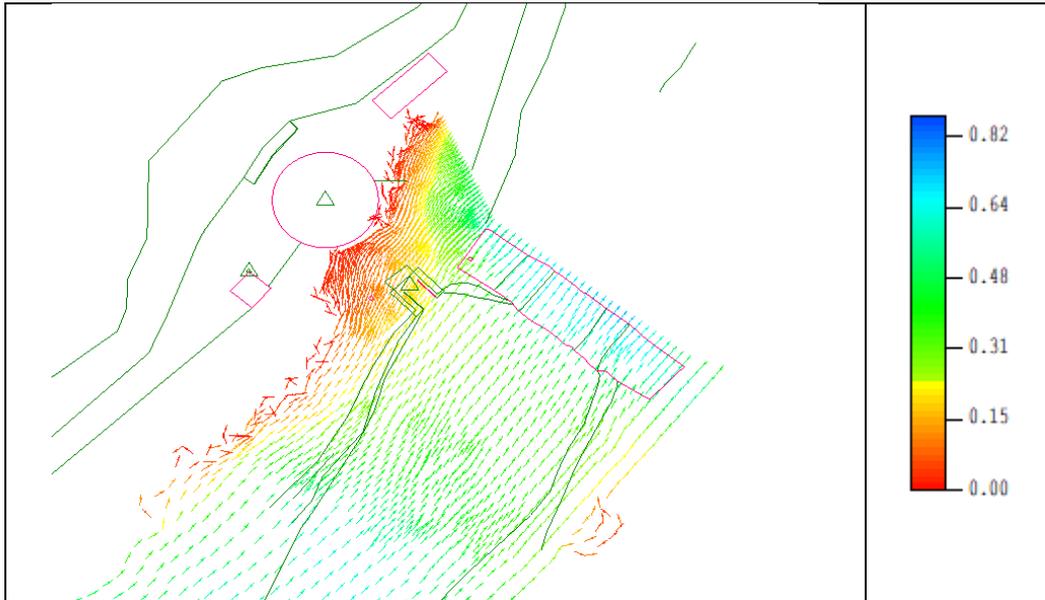


Fig. 8 – Dettaglio della velocità di flusso all’equilibrio vicino al sedimentatore (m/s, simulazione 6)

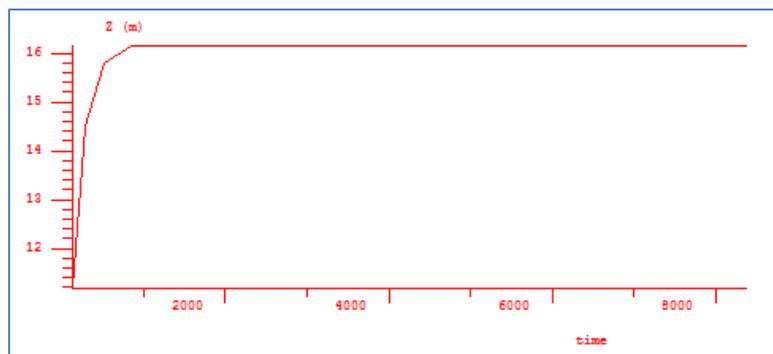


Fig. 9 - Evoluzione del flusso all’equilibrio (simulazione 7, sezione $h_{valle} \approx h_{monte}$)

| Simulazione | h_{monte} (m slm) | h_{valle} (m slm) | ΔH (m) | $\Delta h/L$ | Q (m^3/s) |
|-------------|------------------------|------------------------|----------------|--------------|--------------------|
| 1 | 252.28 | 252.20 | - | 0.00073 | 0.6 |
| 2 | 252.57 | 252.50 | - | 0.00064 | 2 |
| 3 | 252.61 | 252.53 | - | 0.00073 | 3 |
| 4 | 253.28 | 253.20 | - | 0.00073 | 8 |
| 5 | 253.38 | 253.30 | - | 0.00073 | 12 |
| 6 | 253.42 | 253.35 | 0 | 0.00064 | 16 |
| 7 | 253.59 | 253.53 | 0.18 | 0.00055 | 17 |
| 8 | 253.63 | 253.56 | 0.21 | 0.00064 | 20 |
| 9 | 253.65 | 253.60 | 0.25 | 0.00045 | 22 |
| 10 | 253.80 | 253.73 | 0.38 | 0.00064 | 29 |
| 11 | 254.05 | 254.00 | 0.65 | 0.00045 | 35 |
| 12 | 254.13 | 254.05 | 0.70 | 0.00073 | 43 |
| 13 | 254.50 | 254.42 | 1.07 | 0.00073 | 63 |
| 14 | 254.70 | 254.62 | 1.27 | 0.00073 | 75 |
| 15 | 255.50 | 255.42 | 2.07 | 0.00073 | 136 |
| 15 | 256.00 | 255.92 | 2.57 | 0.00073 | 195 |
| 15 | 256.13 | 256.04 | 2.69 | 0.00082 | 216 |

Tab. 2 - Sintesi delle simulazioni (in rosa h_{valle} = colmo del muretto del sedimentatore, ΔH = variazione rispetto a quota muretto)

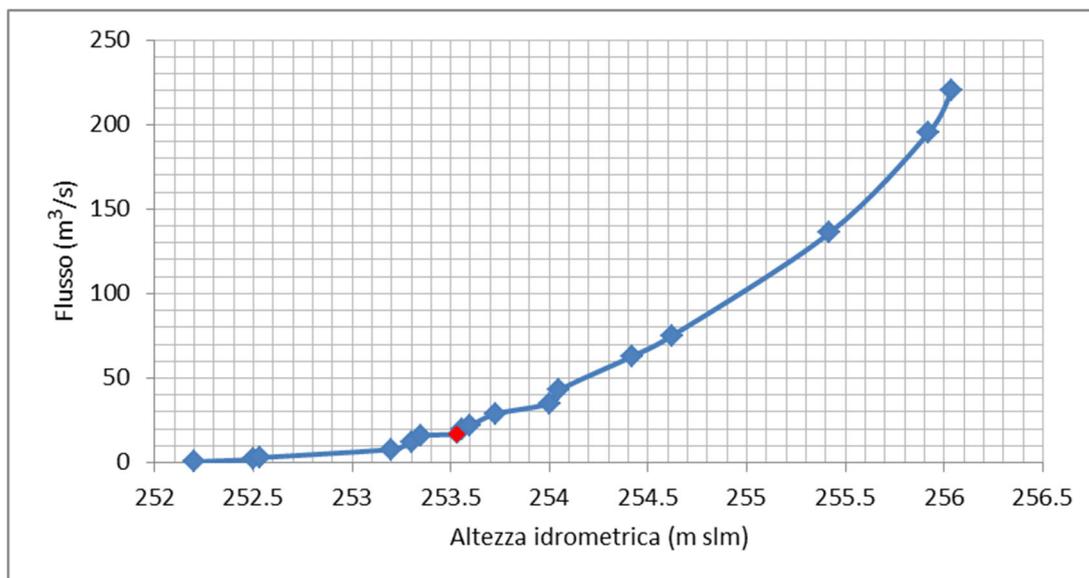


Fig. 10 - Possibile scala di deflusso alla sezione di valle

5. EFFETTI ALL'ALTEZZA DEL SEDIMENTATORE

La grandezza di interesse da stimare è la frequenza degli interventi di pulizia necessari per mantenere operativo il sedimentatore; questa grandezza dipende dall'altezza del muro di protezione, che limita l'ingresso alle piene, e che a sua volta dipende dal tirante idrico degli eventi in quel punto.

Non avendo a disposizione tutte le grandezze necessarie a calcolare direttamente il valore del deflusso per un assegnato periodo di ritorno (si veda, per i bacini romagnoli, Franchini 2000 a e 2000 b), è stato necessario per prima cosa verificare la relazione tra tempo di ritorno (T) e deflusso Q accettabile per il bacino (e sottobacini) di interesse. Questa relazione è stata ricavata da Franchini (2000 a), regredendo le serie di tali deflussi presso le sezioni di interesse a Sarna (Lamone) e a Rivalta (Marzeno), riportate in Tab. 3.

Le equazioni così ottenute sono le seguenti:

$$Q = 91,3 * \ln(T) + 53,7 \quad (1), \text{ Lamone a Sarna}$$

$$Q = 78,6 * \ln(T) + 46,8 \quad (2), \text{ Marzeno a Rivalta}$$

In cui T è il tempo di ritorno e Q il deflusso. Una volta completate le serie per le due sezioni di riferimento e per i periodi di ritorno minori, per tentativi è stata approssimata la (3) per stimare le medesime grandezze a Campatello:

$$Q = 36,0 * \ln(T) + 26,5 \quad (3), \text{ Tramazzo a Campatello}$$

I valori derivati dalle (1), (2), e (3) sono riportati in Tab. 3 e in Fig. 11.

L'ultimo passaggio consiste nel correlare i deflussi, per i tempi di ritorno calcolati, con le altezze idrometriche relative.

L'equazione che è stata regredita con le $h=f(Q)$ di Tab. 3, in questo caso, è:

$$y = -5E-05x^2 + 0.024x + 253.1 \quad (4)$$

e che è stata utilizzata in definitiva per stimare i tiranti idrici alla quota del sedimentatore e per assegnati tempi di ritorno (H_{sedim} in tabella).

La tabella è completata, sempre relativamente alla sezione di Campatello, con le elevazioni sopra la quota presa a riferimento (ΔH , rispetto al colmo del muretto del sedimentatore).

| T (anni) | Lamone (Sarna) (m ³ /s) | Marzeno (Rivalta) (m ³ /s) | Tramazzo (Campatello) (m ³ /s) | H _{sedim} (m slm) | ΔH (m) |
|----------|------------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------|--------|
| 1 | 54 | 47 | 27 | 253.23 | -0.12 |
| 3 | 154 | 133 | 66 | 254.32 | 0.97 |
| 5 | 201 | 173 | 84 | 254.66 | 1.31 |
| 10 | 264 | 228 | 109 | 255.03 | 1.68 |
| 15 | 301 | 260 | 124 | 255.21 | 1.86 |
| 20 | 327 | 282 | 134 | 255.34 | 1.99 |
| 30 | 364 | 314 | 152 | 255.58 | 2.23 |
| 50 | 411 | 354 | 180 | 256.04 | 2.69 |
| 100 | 474 | 409 | 203 | 256.57 | 3.22 |
| 200 | 537 | 463 | 221 | 257.13 | 3.78 |
| 500 | 621 | 535 | 265 | 259.17 | 5.82 |

Tab. 3 - Serie di Franchini in rosso, poi quelle calcolate con le (1), (2) e (3) in viola, con la (4) in verde

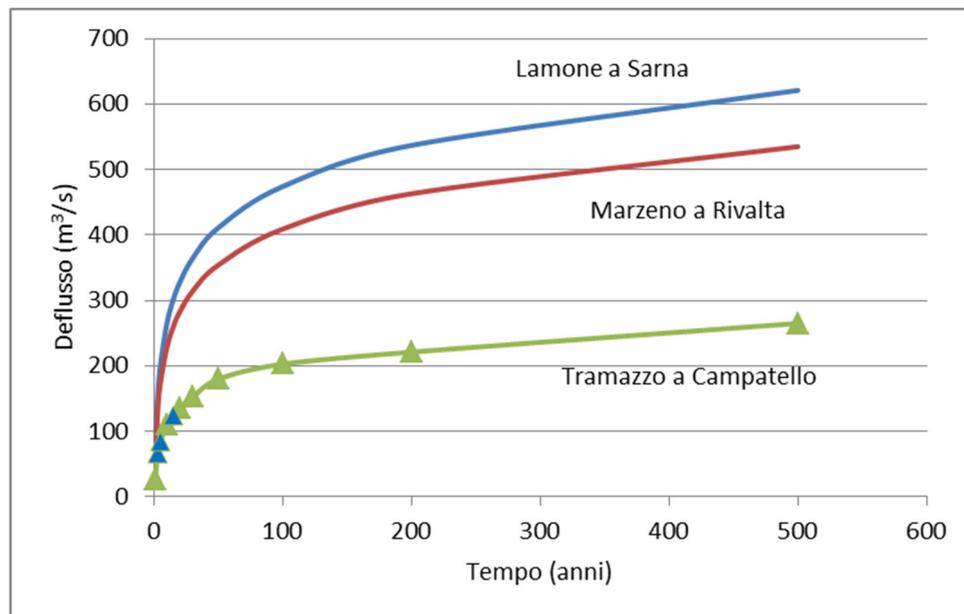


Fig. 11 - Completamento delle stime del deflusso con le (1), (2) e (3). I valori con i simboli blu a Campatello derivano dalle simulazioni

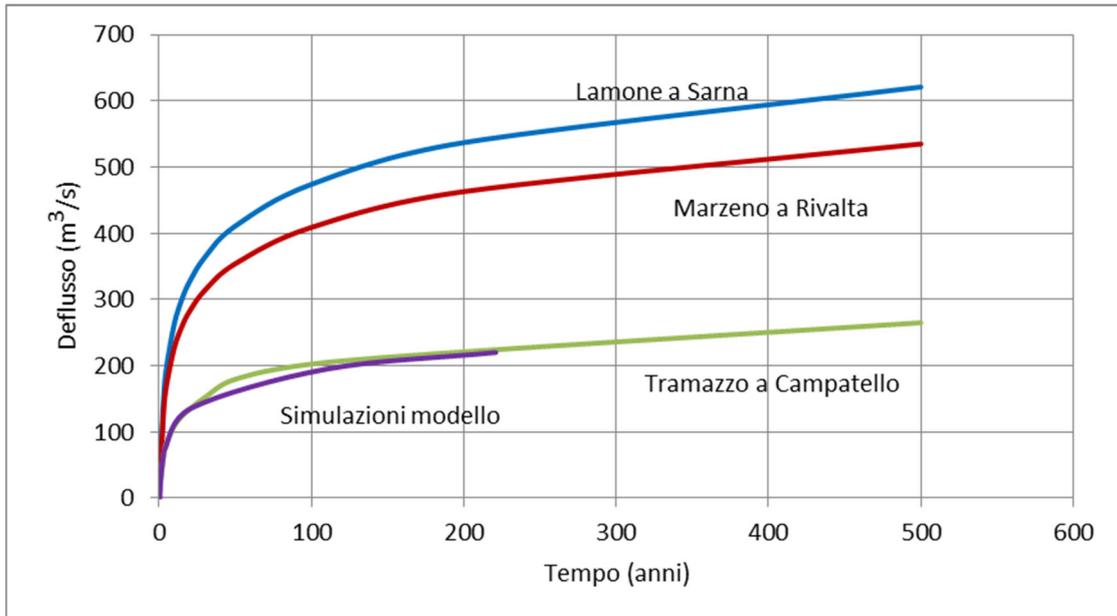


Fig. 12 - Completamento delle stime del deflusso con le (1), (2) e (3) e le simulazioni numeriche (viola)

Per completare il quadro descrittivo all'altezza del sedimentatore, di seguito sono riportate le velocità simulate in funzione delle portate (Fig. 13).

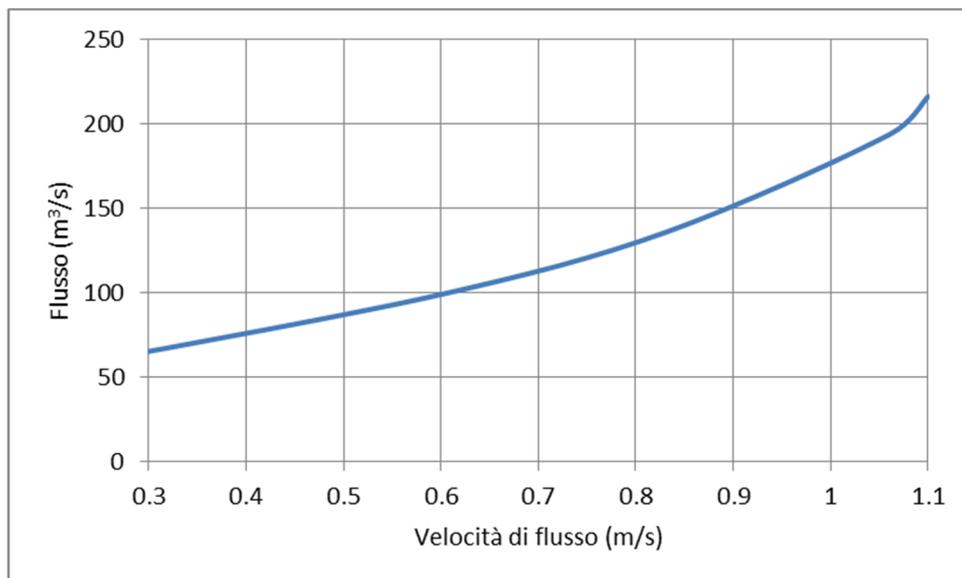


Fig. 13 – Velocità di flusso al sedimentatore

6. EFFETTI ALL'ALTEZZA DELL'IDROMETRO RADAR

Le immagini che seguono riportano i risultati delle simulazioni all'altezza della sezione prevista per il nuovo idrometrografo. I risultati sono espressi nei termini della velocità rispetto al deflusso (Fig. 14) e dell'altezza idrometrica rispetto al deflusso (Fig. 15).

Le due serie di valori sono poi state regredite per stimare le possibili rispettive equazioni:

$$Q = 0,72 e^{4,37V}$$

$$Q = 17,28 H^2 - 8730,7 H + 1e^{+6}$$

In cui, ovviamente, Q rappresenta il deflusso, H l'altezza idrometrica e V la velocità di deflusso.

Da notare la maggiore dispersione delle velocità, dovuta alle non trascurabili variazioni morfologiche corrispondenti ad altrettante variazioni della sezione bagnata.

La situazione di maggior interesse, ovviamente, è data dai valori di altezza e velocità nelle condizioni critiche della Q_{200} e che corrispondono rispettivamente a $V = 1,34$ m/s e $H = 256,11$ m slm.

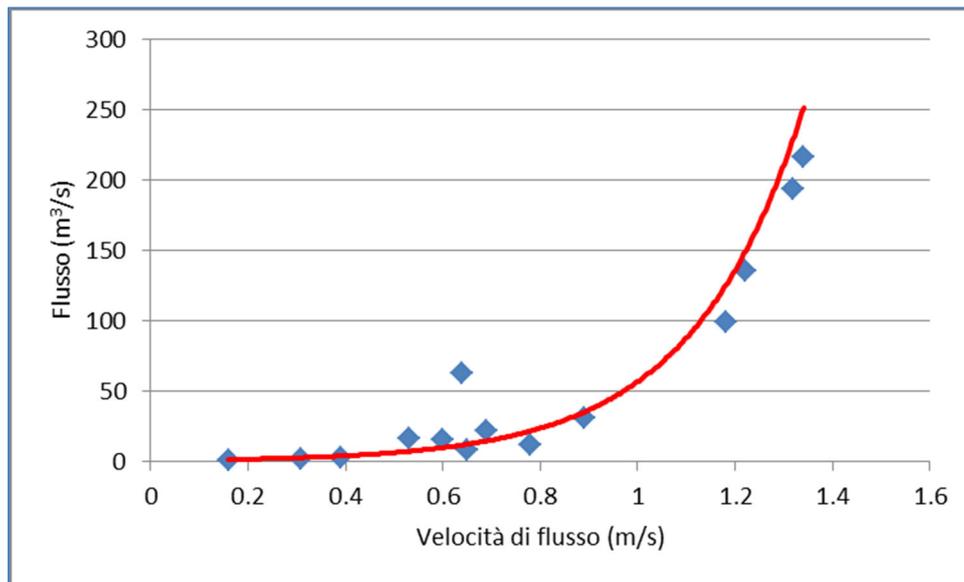


Fig. 14 - Flusso in funzione della velocità (simulazioni)

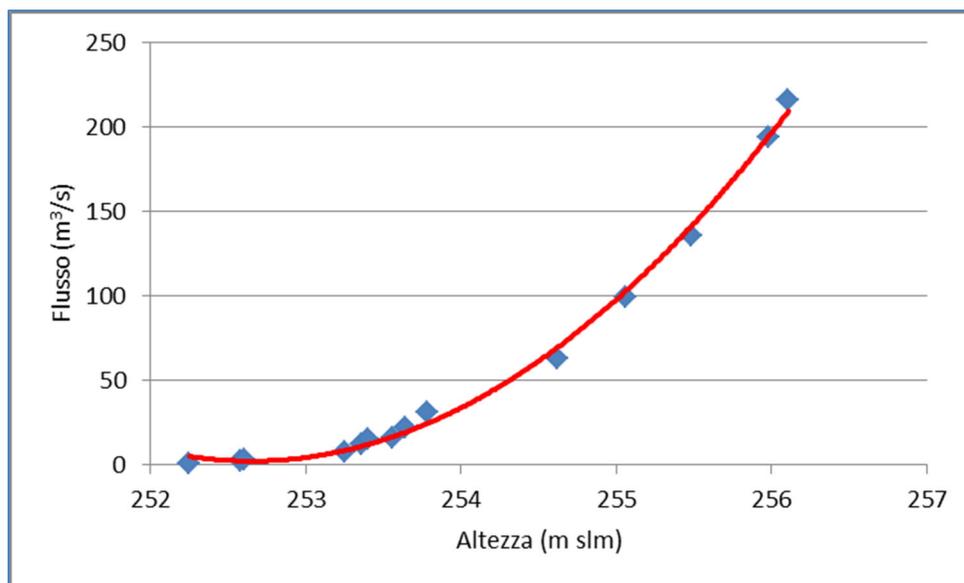


Fig. 15 – Flusso in funzione dell'altezza idrometrica (simulazioni)

7. ASSETTO DEL FONDO DELL'ALVEO

Per realizzare una simulazione dell'evoluzione dell'alveo bisognerebbe disporre di almeno due batimetrie, la seconda delle quali in condizioni il più possibile naturali.

In assenza, nelle simulazioni è stata attivata una stima del coefficiente di sforzo dovuto alla corrente (τ_b) e dell'attrito di fondo (τ_c) considerando il caso più semplice della sola velocità di flusso e del tirante. Si tratta di valutazioni del tutto ipotetiche, in assenza di altre adeguate informazioni, ma che possono dare un'idea parametrica delle condizioni locali considerando il rapporto sforzi / resistenze (r):

$$r = (\tau_b - \tau_c) / \tau_c$$

Dalle due prime immagini (Fig. 16 (a) e (b)) si vede che, in condizioni di magra, lo sforzo idrodinamico è piccolo rispetto alla resistenza sul fondo (sempre in base alle molte ipotesi fatte) e che in definitiva l'alveo è sostanzialmente molto stabile e che l'intensità del flusso, sempre a queste condizioni, non è in grado di modificare la morfologia.

La simulazione successiva, che si riferisce alla Q_{200} , mantiene condizioni del tutto simili, anche se la corrente è sicuramente più aggressiva.

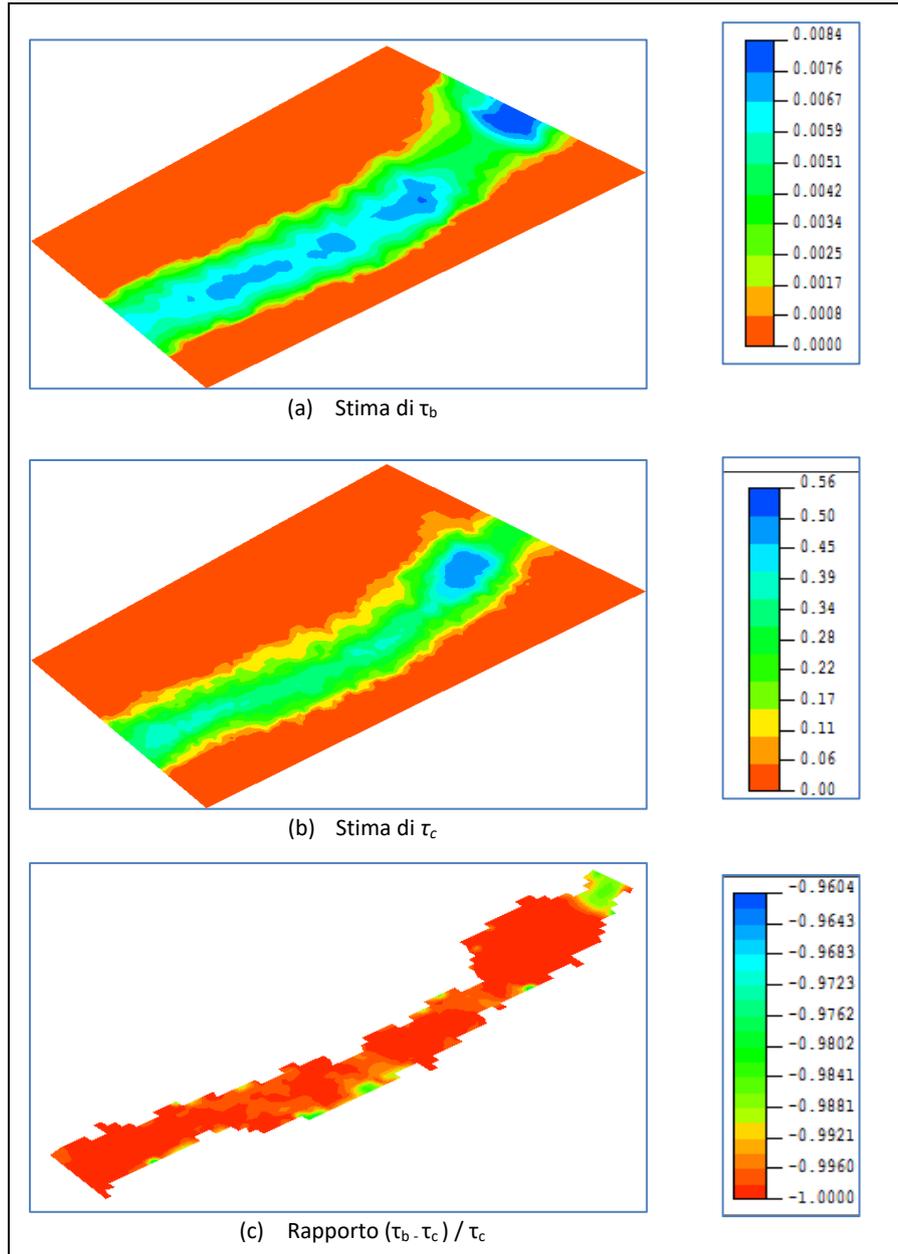


Fig. 16 - Simulazione 6, all'equilibrio

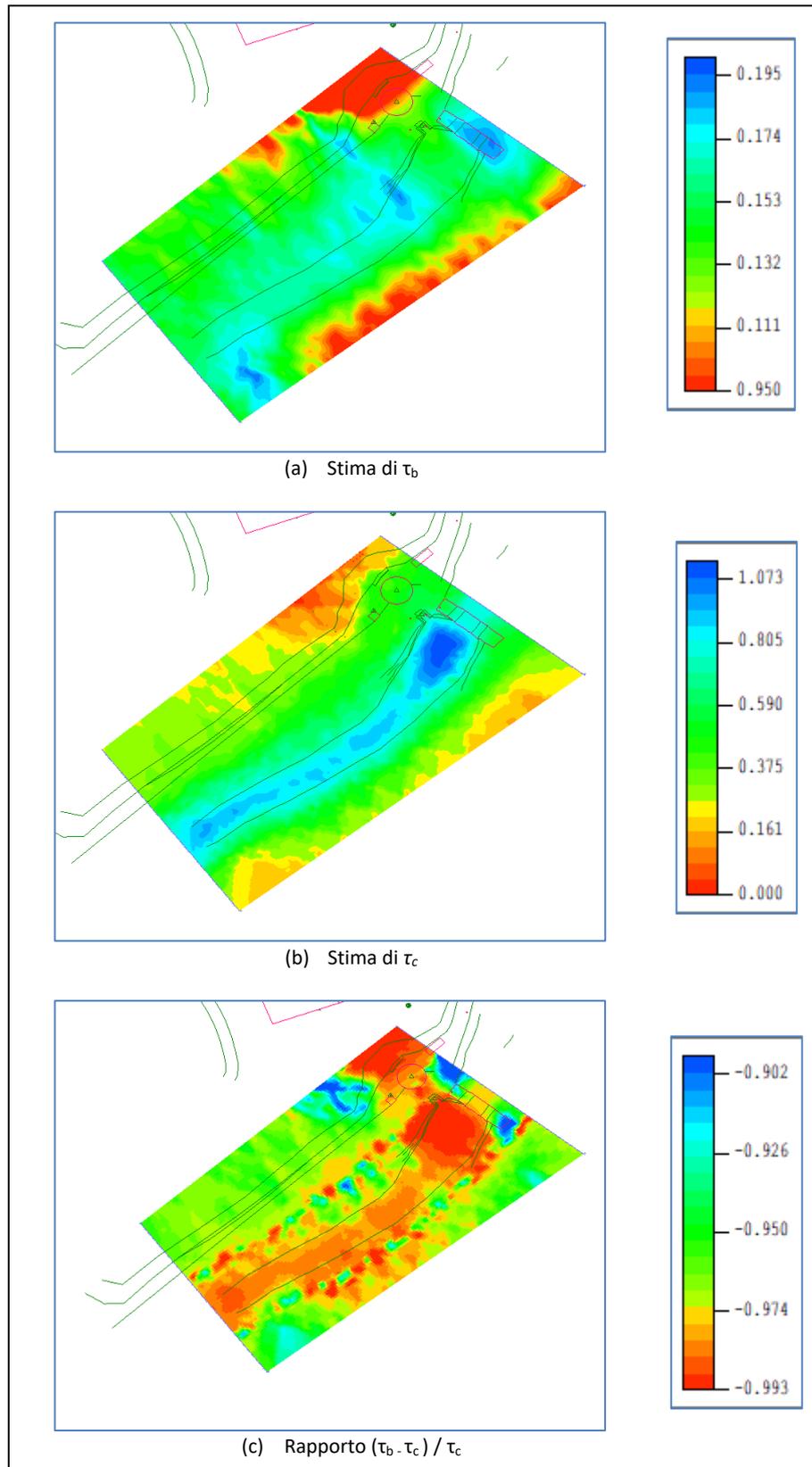


Fig. 17 - Simulazione 14 con Q_{200} , all'equilibrio

8. IDROMETROGRAFO A MONTE DELLA PRESA

Sulla base delle considerazioni precedenti, l'altezza che è stata stimata per mettere in sicurezza la strumentazione (si ricorda che non esistono manufatti utilizzabili a questo scopo) in corrispondenza della nuova sezione di interesse è di 256,11 m s.l.m. se si considera come critica la Q_{200} , pari a circa 216 m³/s. A questa corrisponde anche una velocità di circa 1,34 m/s, sempre in corrispondenza dell'idrometro (Fig. 18).

Al livello di piena si deve aggiungere la distanza minima necessaria allo strumento per poter funzionare (20 cm).

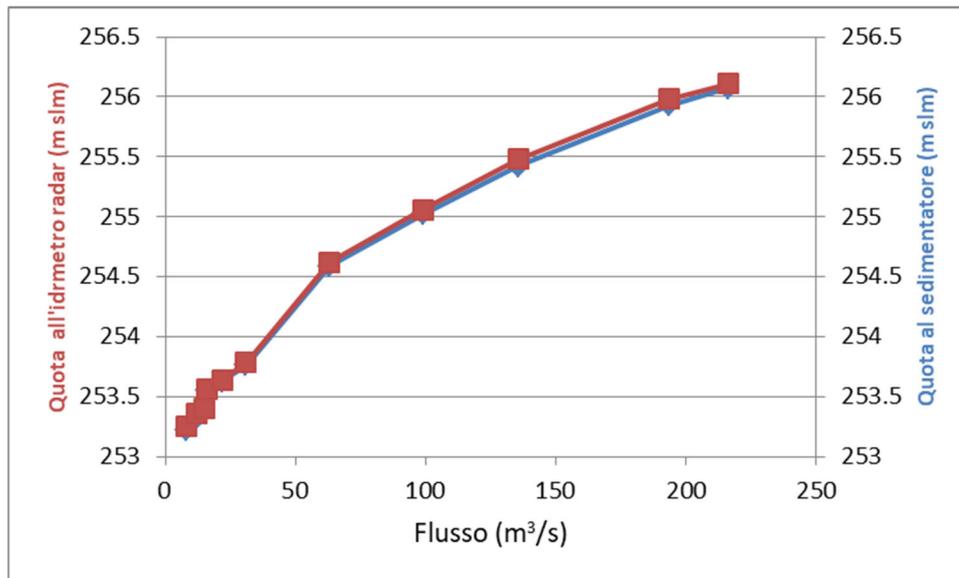


Fig. 18 – Flusso e quote all'idrometro e al sedimentatore

9. SOGLIA IN ALVEO E PROTEZIONE DELLE RIVE

Si è previsto di stabilizzare la sezione idrometrografica allestendo una soglia in cemento armato posta trasversalmente all'alveo a circa 60 m a monte dell'opera di presa. Si tratta di una trave con il colmo alla medesima quota del fondo alveo e con la medesima inclinazione, in modo da non costituire una barriera al deflusso ed evitare la formazione di vortici.

La soglia va stabilizzata rivestendo il fondo dell'alveo con massi ciclopici squadrati a monte e a valle per 20 m.

Infine, sempre per garantire la stabilità, le sponde vengono rivestite con massi ciclopici non squadrati per tutta la distanza tra la sezione e la briglia.

10. BIBLIOGRAFIA

Dalla Fontana G., *Correzione dei torrenti e quantificazione trasporto solido*, A.A. 2013/2014, Università di Padova.

Davis T. A., *Algorithm 832*. ACM Transactions on Mathematical Software. 30 (2): 196–199, 2004

Einstein H. A., Krone R. B., *Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water*, J. Geophys. Res.: 1451–1461., april, 1962

Franchini M., *Valutazione delle portate massime e degli idrogrammi di piena di assegnato rischio in otto sezioni fluviali di interesse dell'autorità dei bacini regionali romagnoli*, Fase II – Stima delle precipitazioni e della portata al colmo per assegnato tempo di ritorno T, Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2000, (a)

- Franchini M.**, *Valutazione delle portate massime e degli idrogrammi di piena di assegnato rischio in otto sezioni fluviali di interesse dell'autorità dei bacini regionali romagnoli*, Fase III – Gli idrogrammi di piena di assegnato tempo di ritorno T, Autorità dei Bacini Regionali Romagnoli, 2000 (b)
- Froehlich D. C.**, *Finite Element Surface-Water Modeling System: Two Dimensional Flow in a Horizontal Plane*. Users Manual, Federal Highway Administration Report FHWA- RD-88-177, 285 p., 1989.
- Graf W. H.**, *Hydraulics of Sediment transport*. Mc Graw-Hill Book Company, 1971, 512 pp.
- Hayter E. J., Berg M. A., Gu R., McCutcheon S. C., Jarrell Smith S., Whiteley H. J.**, *HSCTM-2D, A finite element model for depth-averaged hydrodynamics, sediment and contaminant transport*, National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia 30605, May 1995.
- Patrizi G.**, *Simulazione del comportamento idrodinamico delle opere di protezione in foce Lamone a Ravenna*, Comune di Ravenna, U.O. Geologico, 2018. Report finale, 23 pp.