

COMUNE DI BRESCIA - *Assessorato all'Urbanistica e Pianificazione per lo sviluppo sostenibile - Area Pianificazione urbana e Mobilità - Settore Urbanistica*

SINDACO

Dott. Emilio Del Bono

ASSESSORE

Prof. Ing. Michela Tiboni

DIRIGENTE

Arch. Gianpiero Ribolla

UFFICIO DI PIANO

Arch. Fabio Gavazzi

Arch. Laura Treccani

CONSULENTI

Dott. Geol. Davide Gasparetti

Dott. Geol. Gianantonio Quassoli

Ing. Giuseppe Rossi

ADEGUAMENTO DELLA COMPONENTE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA DEL PGT AL PIANO DI GESTIONE DEL RISCHIO ALLUVIONI (P.G.R.A.) (D.G.R. 19 GIUGNO 2017 N. 9/6738)



**V.I.-ALALL
04L-00**

**RELAZIONE IDROLOGICA E IDRAULICA -
INQUADRAMENTO METODOLOGICO**

Scala

Data

GENNAIO 2018

SOMMARIO

1.	PREMESSA	3
2.	AMBITI TERRITORIALI INTERESSATI DALLO STUDIO	4
3.	PROCEDIMENTO DELLO STUDIO	4
3.1	FIUME MELLA E TORRENTE GARZA.....	5
3.2	TORRENTI MANDOLOSSA, CANALE, SOLDA.....	7
3.3	TORRENTE GARZETTA DI COSTALUNGA E RIO VAL BOTTESA.....	7
4.	PROCEDIMENTO DI CALCOLO E DI ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO... 8	
5.	DOCUMENTI ILLUSTRATIVI DELLO STUDIO IDRAULICO.....	15
6.	RELAZIONE DI CONSULENZA SCIENTIFICA	16

1. PREMESSA

Il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), approvato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po con deliberazione n. 2 del 3 marzo 2016 e successivamente dal Presidente del Consiglio dei Ministri con DPCM 27 ottobre 2016, contiene l'individuazione delle aree potenzialmente interessate da alluvioni, e, all'interno di esse, classifica il grado di pericolosità in funzione della frequenza degli eventi alluvionali ed il grado di rischio al quale sono esposti gli elementi ivi presenti.

La mappatura delle aree inondabili, contenuta nel PGRA, integra il quadro conoscitivo del Piano per l'Assetto idrogeologico di bacino (PAI), con lo scopo di applicare all'interno delle predette aree, in funzione dei vari scenari di pericolosità e del rischio, una idonea normativa d'uso del suolo.

L'Autorità di Bacino del fiume Po, con deliberazione n. 5 del Comitato Istituzionale in data 7 dicembre 2016, ha pertanto adottato una Variante alle Norme di Attuazione del PAI, aggiungendo un Titolo V contenente "*Norme in materia di coordinamento tra il PAI e il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA)*".

Regione Lombardia, al fine di dare attuazione ai contenuti del PGRA ai sensi dell'art. 58 delle Norme di Attuazione del PAI, come integrate dalla predetta variante, ha approvato le Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del PGRA nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza, con Deliberazione della Giunta Regionale n. X/6738 in data 19 giugno 2017.

Il Comune di Brescia, ai sensi dell'art. 59 del nuovo Titolo V delle Norme di Attuazione del PAI e conformemente alle predette Direttive regionali, ha avviato il procedimento di adeguamento della componente geologica del PGT al PAI coordinato con il PGRA,

A tale scopo è necessario verificare e adeguare il quadro delle condizioni di pericolosità e di rischio idraulico già individuate nella componente geologica del PGT, alla luce delle risultanze del PGRA e di ulteriori studi di approfondimento idraulico condotti su aree del territorio comunale non interessate dal PGRA o dal PAI, con contestuale aggiornamento della fattibilità geologica delle azioni di piano.

Questa relazione illustra il procedimento e la metodologia dello studio idraulico di approfondimento eseguito allo scopo di valutare le condizioni di pericolosità e di rischio idraulico locali condotti nei seguenti ambiti:

- all'interno delle aree edificate del territorio comunale di Brescia individuate come allagabili nella cartografia del PGRA, interessate da alluvioni poco frequenti (aree P2/M);

- all'interno di aree oggetto di previsioni di trasformazione urbanistica del PGT vigente (AT-B.1, AT-A.2, AT-D4, Pre6, Pre13, PAV517, Pse3), individuate come allagabili nella cartografia del PAI, interessate da alluvioni poco frequenti (aree P2/M);
- all'interno di aree edificate del territorio comunale di Brescia esterne al PGRA, comprese le previsioni di trasformazione urbanistica del PGT vigente (AT-E.5 e PAV-502), individuate come allagabili sulla base di altri studi di approfondimento locale,

lungo i corsi d'acqua: fiume Mella, torrente Garza, torrente Mandolossa, torrente Canale, torrente Solda, torrente Garzetta di Costalunga e Rio Val Bottesa.

2. AMBITI TERRITORIALI INTERESSATI DALLO STUDIO

Le aree potenzialmente allagabili dai corsi d'acqua oggetto dello studio, sono interessate dagli ambiti territoriali individuati come segue:

- Ambito Territoriale RP – Reticolo Principale del PGRA
 - Fiume Mella: già interessato nella pianificazione di bacino vigente dalla delimitazione delle fasce fluviali;
 - Torrente Garza: non interessato nella pianificazione di bacino vigente dalla delimitazione delle fasce fluviali;
- Ambito Territoriale RSCM – Reticolo Secondario Collinare e Montano del PGRA
 - Torrente Mandolossa, torrente Canale e torrente Solda: non interessati nella pianificazione di bacino vigente dalla delimitazione delle fasce fluviali;
- Ambito Territoriale Reticolo Idrico Minore
 - Torrente Garzetta di Costalunga e Rio Val Bottesa: non interessati dalla pianificazione di bacino;

3. PROCEDIMENTO DELLO STUDIO

Lo studio è condotto conformemente alle metodologie definite nell'Allegato 4 alla DGR 30 novembre 2011, n. IX/2616 e nella direttiva contenente i criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico, approvate dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po con deliberazione n. 2/99 del 11 maggio 1999 e n. 10/06 del 5 aprile 2006.

La valutazione delle condizioni di pericolosità e rischio locali, all'interno delle aree allagabili, è

basata sui risultati della modellazione idraulica bidimensionale del deflusso delle acque esondate dai corsi d'acqua durante il transito della piena di riferimento.

La modellazione idraulica è stata eseguita mediante l'utilizzo del codice di calcolo HEC-RAS versione 5.0.3, e dei più recenti rilievi topografici ad alta precisione, ottenuti con tecnologia Laser Scanning LiDAR- Light Detection And Ranging, resi disponibili dal MATTM tramite Regione Lombardia.

La modellazione combina il calcolo dei profili di moto vario monodimensionale (1D) lungo l'asta del corso d'acqua con il calcolo del deflusso bidimensionale (2D) delle acque esondate nelle aree interessate dagli allagamenti.

Le basi teoriche e le modalità di utilizzo del programma, anche per quanto riguarda la verifica delle scelte delle opzioni di calcolo e dei coefficienti introdotti negli algoritmi dei modelli utilizzati, sono illustrate nell'allegata relazione della Dott. Ing. Francesca Berteni - Università degli Studi di Brescia, DICATAM, di sintesi della collaborazione di supporto scientifico resa durante lo svolgimento del presente lavoro.

I modelli di calcolo implementati tengono conto ed utilizzano i dati contenuti nei documenti del PGRA e negli studi idraulici di approfondimento, come illustrato nel seguito per i diversi corsi d'acqua considerati.

3.1 Fiume Mella e torrente Garza

Appartengono al Reticolo principale (RP) e pertanto, nelle carte del PGRA, sono delimitate le relative aree di allagamento, in funzione del tempo di ritorno degli eventi di piena.

Si utilizzano i dati del PGRA, con particolare riferimento al documento *“Profili di piena dei corsi d'acqua del reticolo principale”* e quelli contenuti nello *“Studio di fattibilità della sistemazione idraulica del fiume Oglio nel tratto da Sonico alla confluenza in Po e del suo affluente Cherio dal lago di Endine alla confluenza, del fiume Mella da Brozzo alla confluenza in Oglio, del fiume Garza dalla confluenza Valle del Loc alla confluenza in Chiese e del fiume Chiese da Gavardo alla confluenza in Oglio”*, redatto dall'Autorità di Bacino.

Per entrambi i corsi d'acqua, il tempo di ritorno della piena di progetto è quello a cui fa riferimento la mappatura delle aree allagabili per l'evento poco frequente (P2/M):

- Per il fiume Mella, il tempo di ritorno è pari a 200 anni, e la mappatura delle aree allagabili per l'evento poco frequente (P2/M), è quella contenuta nella cartografia del

PGRA;

- Per il torrente Garza, il tempo di ritorno è pari a 100 anni, come chiarito dalla Regione Lombardia - U.O. Difesa del suolo - Struttura pianificazione dell'assetto idrogeologico, e la perimetrazione delle aree allagabili per l'evento poco frequente (P2/M) è quella fornita dalla predetta U.O. regionale, e non quella attualmente contenuta nella cartografia del PGRA pubblicata.

Si precisa che, poiché la simulazione bidimensionale dei fenomeni di allagamento delle aree esterne all'alveo fluviale, mediante il software utilizzato, richiede il contestuale calcolo dei profili della piena lungo l'asta del corso d'acqua, anche nel caso del fiume Mella e del torrente Garza, nonostante siano forniti nei documenti del PGRA i dati dei profili delle piene di riferimento, si procede al calcolo dei profili di piena lungo le aste fluviali, limitatamente ai tronchi interessati, utilizzando la medesima geometria rappresentata dalle sezioni del PAI e dello Studio di fattibilità, aggiornate ed infittite ove necessario con nuovo rilievo topografico, eseguito nello scorso mese di settembre.

I limiti di monte e di valle dei tronchi dei corsi d'acqua oggetto delle modellazioni, sono individuati in modo che si possano applicare al contorno condizioni congruenti con i dati forniti nella documentazione del PGRA. L'estremo di monte dei tronchi considerati si trova, pertanto, in corrispondenza del punto in cui, nelle mappe del PGRA, è individuato l'inizio della tracimazione delle acque dall'alveo, causa dell'allagamento delle aree allo studio. Sempre all'estremo di monte, ed eventualmente lungo il percorso come nel caso del Garza in località San Polo, si applicano gli idrogrammi delle piene di riferimento del PGRA. All'estremo di valle, si introduce nel calcolo, quale condizione al contorno, il valore della cadente del profilo idraulico del PGRA.

Il calcolo dei profili idrici tiene conto delle attuali condizioni strutturali e di stato dei corsi d'acqua, così come il calcolo delle modalità di esondazione delle acque dall'alveo e di espansione nelle aree allagate si basa sulla morfologia e sull'uso del suolo, rappresentati dal modello digitale del terreno fornito dal rilievo LiDAR più aggiornato, con risoluzione a terra 1 metro.

Poiché inoltre la modellazione idraulica è condotta al moto vario, si utilizzano, nel calcolo, i dati numerici degli idrogrammi delle piene di riferimento, contenuti nella documentazione dell'AdBPo. I profili delle piene di progetto del PGRA sono pertanto confrontabili con i profili involuppo dei massimi livelli di moto vario raggiunti nelle sezioni di calcolo, risultanti dalla simulazione del transito delle piene.

3.2 Torrenti Mandolossa, Canale, Solda

Questi corsi d'acqua appartengono al Reticolo secondario collinare e montano (RSCM), per i quali sono delimitate nella cartografia del PGRA le aree di allagamento, sulla base dello “*Studio idrogeologico ed idraulico a scala di sottobacino idrografico dei torrenti Solda, Canale, Livorna, Gandovere e Mandolossa*”, redatto nel 2014 (Prof. Ing. B. Bacchi et al.) per conto dei comuni interessati.

Detto studio, tuttavia, non contiene i dati relativi agli idrogrammi delle piene di riferimento ed ai corrispondenti profili idraulici rappresentativi dello stato attuale della rete idrografica, necessari per l'applicazione nel procedimento di calcolo al moto vario.

Il calcolo idrologico a scala di sottobacino è stato pertanto rifatto ex novo, al fine di determinare gli idrogrammi della piena di riferimento, relativa al tempo di ritorno di 100 anni, per la modellazione al moto vario, nell'ambito territoriale del Comune di Brescia.

Il modello geometrico dei corsi d'acqua è stato costruito sulla base di un rilievo topografico, appositamente eseguito nello scorso mese di settembre.

Il modello digitale del terreno, per la modellazione 2D, utilizza il rilievo LiDAR 2008-2009, per la parte del territorio coperta da tale rilievo, integrato con il DTM risoluzione 5 metri, della Regione Lombardia, edizione 2015.

3.3 Torrente Garzetta di Costalunga e Rio Val Bottesa

Questi corsi d'acqua appartengono al Reticolo Idrico Minore (RIM) di competenza comunale, non compresi nella cartografia del PGRA.

L'ambito territoriale interessato riguarda la parte del territorio comunale di Brescia, Zona Nord – Quartiere Mompiano, zona urbana pedecollinare della Costalunga.

Le criticità idrauliche di questi corsi d'acqua sono state oggetto di uno studio idrologico e idraulico, a scala di sottobacino locale, “*Indagine relativa alla criticità di carattere idraulico riguardante il bacino del fiume Celato e suoi affluenti – torrente Garzetta di Costalunga e rio Val Bottesa, in Comune di Brescia*” (Ing. G. Rossi), redatto in data settembre 2016 per incarico del Comune di Brescia, Settore Verde, Parchi e Reticolo idrico.

Nel predetto studio, l'analisi idraulica è stata condotta mediante modellazione al moto permanente delle portate al colmo delle piene di progetto dei due corsi d'acqua, riferite al tempo di ritorno di 100 anni, con il principale scopo di individuare, a livello di progetto di fattibilità, le opere necessarie per la messa in sicurezza del quartiere, compatibilmente con la capienza del sistema idrografico ricettore.

I recenti dati conoscitivi acquisiti e le elaborazioni idrologiche compiute per lo svolgimento del predetto studio, sono validamente utilizzabili al fine di accertare le condizioni di pericolosità e rischio idraulico nell'area urbanizzata, tramite modellazione al moto vario 1D/2D, poiché l'area è coperta dal rilievo LiDAR

4. PROCEDIMENTO DI CALCOLO E DI ZONAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO

La determinazione dei dati necessari al fine di perimetrare le aree allagabili e di caratterizzare all'interno di esse le varie zone a diverso grado di pericolosità e rischio idraulico, è il risultato di un procedimento di calcolo e d'indagine sviluppato, per ciascun ambito territoriale, secondo i passi illustrati nel seguito.

Creazione del modello geometrico del corso d'acqua e della regione fluviale

Il modello geometrico del corso d'acqua nel codice di calcolo Hec-Ras è rappresentato per sezioni trasversali, comprendenti l'alveo, gli argini e le aree golenali, e con l'introduzione di strutture trasversali interferenti con i deflussi, quali ponti, traverse e tombature. L'asse del corso d'acqua e le sezioni trasversali sono georeferenziate nel sistema di coordinate WGS84.

Nei casi del fiume Mella e del torrente Garza, si utilizzano le sezioni e le monografie delle strutture trasversali rappresentate nella documentazione del PAI e dello Studio di fattibilità dell'AdBPo, aggiornate ed infittite, ove necessario, tramite nuovo rilievo topografico. Nel caso degli altri corsi d'acqua minori, i modelli sono costruiti sulla base di rilievi topografici recenti ed attuali, ove esistenti, o altrimenti di nuovi rilievi appositamente eseguiti.

Nel caso dei corsi d'acqua minori ramificati, si utilizza una particolare funzione del programma (Junction) che consente di configurare la giunzione dei rami confluenti nello schema geometrico del modello, e di calcolare simultaneamente ed in modo congruente fra loro i profili idrici lungo ogni ramo, ciascuno con le proprie condizioni al contorno ed i dati in ingresso relativi alle portate.

I coefficienti di scabrezza e di contrazione ed espansione sono determinati a seguito delle visite sopralluogo al corso d'acqua, con riferimento ai valori di letteratura applicabili alla casistica accertata ed alle verifiche compiute nell'ambito della consulenza scientifica sull'argomento, ottenuta nel corso del lavoro.

Il modello geometrico del terreno è rappresentato a mezzo di un DTM (modello digitale del terreno) georeferenziate, caricato e gestito dal programma tramite apposita funzione (Ras Mapper). Si utilizzano i dati del modello digitale del terreno forniti dal rilievo LiDAR in tutti gli ambiti

coperti da tale rilievo. Negli altri ambiti, si utilizza il DTM 5x5 edizione 2015 della Regione Lombardia.

La dimensione delle maglie della rete di calcolo è scelta in ciascuna area di allagamento in base alla precisione del modello digitale del terreno ed alla tipologia di copertura ed uso del suolo. Nelle aree pianeggianti a destinazione agricola o a verde non coperte dal rilievo LiDAR, la dimensione scelta per le maglie è 5x5 metri, mentre nelle aree urbane coperte dal rilievo LiDAR è 2x2 metri.

All'interno delle aree di allagamento, sono individuate le varie tipologie di superfici presenti, mediante l'utilizzo degli shape file dell'uso del suolo ricavati dal geoportale della Regione Lombardia. A ciascuna superficie è assegnato un coefficiente di scabrezza, desunto dalla letteratura specializzata e dall'esperienza.

Determinazione delle portate di riferimento

La modellazione idraulica al moto vario, richiede l'introduzione nel procedimento di calcolo, quali condizioni al contorno, degli idrogrammi delle piene di riferimento, determinati in funzione del tempo di ritorno degli eventi. Per i corsi d'acqua del Reticolo principale, gli idrogrammi delle piene di riferimento sono quelli reperibili nella documentazione del PGRA e nello Studio di fattibilità dell'AdBPo. Negli altri casi gli idrogrammi sono calcolati con specifiche analisi idrologiche, svolte secondo le metodologie riportate nell'Allegato 4 alla d.g.r. IX/2616/2011.

Modellazione 1D al moto permanente

Si procede inizialmente alla modellazione del deflusso della portata massima, in condizioni di moto stazionario lungo l'asta del corso d'acqua, al fine di verificare la correttezza del modello geometrico implementato e di apportare le eventuali modifiche in caso di errori o di messaggi di avvertimento, generati dal programma durante il calcolo, fino ad ottenere alla fine della modellazione senza errori un risultato concettualmente corretto, privo di sostanziali messaggi di avvertimento e note.

Modellazione 1D al moto vario

Verificata la corretta modellazione al moto permanente, si passa alla modellazione del deflusso delle portate di moto vario, applicando, quali dati idrologici in ingresso, gli idrogrammi di progetto, ed imponendo il flusso nullo esternamente agli argini o ai cigli delle sponde.

I profili del pelo libero ottenuti, rappresentano l'involuppo dei massimi livelli idrici nelle sezioni e consentono di individuare i tratti dei corsi d'acqua potenzialmente tracimabili, lungo una o entrambe le sponde

Individuazione delle aree di allagamento

Per gli ambiti individuati nel PGRA (RP e RSCM), in linea generale, e comunque in ogni caso in prima ipotesi, le aree di allagamento inserite nel modello di calcolo coincidono con quelle

rappresentate nelle mappe del PGRA per la piena di riferimento (aree P2/M). Qualora la conformazione e l'altimetria delle predette aree, come rappresentato dal rilievo LiDAR, abbia subito modifiche consistenti successivamente all'epoca degli studi compiuti per la redazione delle mappe del PGRA, ed in altri casi di evidente inadeguatezza dei limiti rappresentati nelle predette mappe, anche sulla base dei risultati della prima modellazione 1D/2D, si valutano e si definiscono gli ampliamenti nel modello delle aree di allagamento, in modo adeguato rispetto all'effettiva situazione planoaltimetrica del terreno. Nel caso degli ambiti non individuati nel PGRA, i limiti delle aree di allagamento sono individuati in modo cautelativamente ampio in base all'altimetria del territorio della regione fluviale ed alla presenza di elementi fisici estesi linearmente senza soluzione di continuità, in grado di contenere i presumibili livelli dell'espansione della piena (rilevati stradali e ferroviari, argini, gradini morfologici, ecc.).

Connessioni idrauliche fra gli elementi del modello

Si connette il corso d'acqua alle aree di allagamento o ad un canale derivato e, se necessario, si connettono fra loro aree di allagamento attigue. La connessione si imposta introducendo nel modello le strutture laterali, lungo le sponde del corso d'acqua o al confine fra le aree di allagamento, in cui, per tracimazione o passaggio attraverso un'apertura, le acque possono defluire da una parte all'altra, in entrambe le direzioni, in funzione delle condizioni energetiche delle correnti. La tipologia delle strutture laterali ed i coefficienti di efflusso sono scelti in base agli sviluppi della foronomia, in modo che lo schema impostato ed il calcolo simulino nel miglior modo possibile l'effettivo funzionamento idraulico.

La connessione fra la sponda del corso d'acqua esondabile e l'attigua area di allagamento, si realizza tramite l'inserimento di uno sfioratore laterale, lungo l'intero sviluppo lineare del tratto fluviale interessato dall'esondazione. L'andamento longitudinale della soglia sfiorante corrisponde all'effettivo profilo altimetrico della sponda e del profilo del terreno adiacente alla sponda, ricavato dal DTM. Nel caso di collegamento tramite apertura sotto battente, si inseriscono le relative dimensioni e quote nella geometria della struttura laterale. I coefficienti di efflusso, utilizzati dal programma nelle formule idrauliche della foronomia, sono scelti in base alla tipologia delle strutture ed alle condizioni al contorno, come illustrato nella relazione di consulenza scientifica riportata nel seguente capitolo 6..

Linee di separazione (break line)

All'interno delle aree di allagamento, è possibile inserire, nello schema planimetrico, delle linee di separazione (break line), al fine di simulare un elemento fisico interferente con il deflusso delle acque di scorrimento sul terreno. Questa opzione è utilizzata nei casi in cui il modello digitale del

terreno non consente al programma di individuare con precisione taluni elementi fisici lineari esistenti, o nel caso di infrastrutture realizzate successivamente al rilievo digitale del terreno in uso.

Modellazione idraulica combinata 1D – 2D al moto vario

Completato il modello geometrico ed inseriti i dati idrologici di ingresso e le altre condizioni al contorno, si procede al calcolo della modellazione idraulica, in condizioni di moto vario, del deflusso monodimensionale (1D) dell'idrogramma, o degli ideogrammi, lungo l'asta del corso d'acqua e delle eventuali ramificazioni, combinata con la modellazione bidimensionale (2D) del flusso della acque esondate nelle aree di allagamento.

Il programma calcola le grandezze idrauliche del moto dell'acqua lungo i rami del corso d'acqua, in ogni sezione del modello ed attraverso le strutture trasversali e laterali, ed in ogni cella del reticolo col quale è suddivisa ciascuna area di allagamento, in funzione del tempo, per la durata dell'evento di piena di progetto e secondo il passo temporale impostati.

La grande quantità di dati prodotta, sia in forma tabellare che grafica, anche mediante animazione, consente di verificare, in primo luogo, la rispondenza dei risultati rispetto a quanto ragionevolmente atteso, e quindi di estrapolare, dalla configurazione definitiva, validata dall'esame dei dati nei confronti dello stato del corso d'acqua e dei luoghi, le grandezze necessarie ai fini del lavoro.

Si verificano in particolare: l'andamento dei profili monodimensionali della piena lungo il corso d'acqua e nelle aree di allagamento, la corretta impostazione ed il funzionamento dei collegamenti dei tronchi fluviali con le aree a flusso 2D, come anche fra di esse, e delle linee di separazione.

La modellazione del flusso 2D consente di individuare l'espansione planimetrica massima delle acque all'interno delle aree di allagamento, come delimitate nel modello. Qualora il risultato dimostri la necessità di ampliare il perimetro delle aree stesse, si apportano le opportune modifiche allo schema geometrico e si procede con una nuova modellazione.

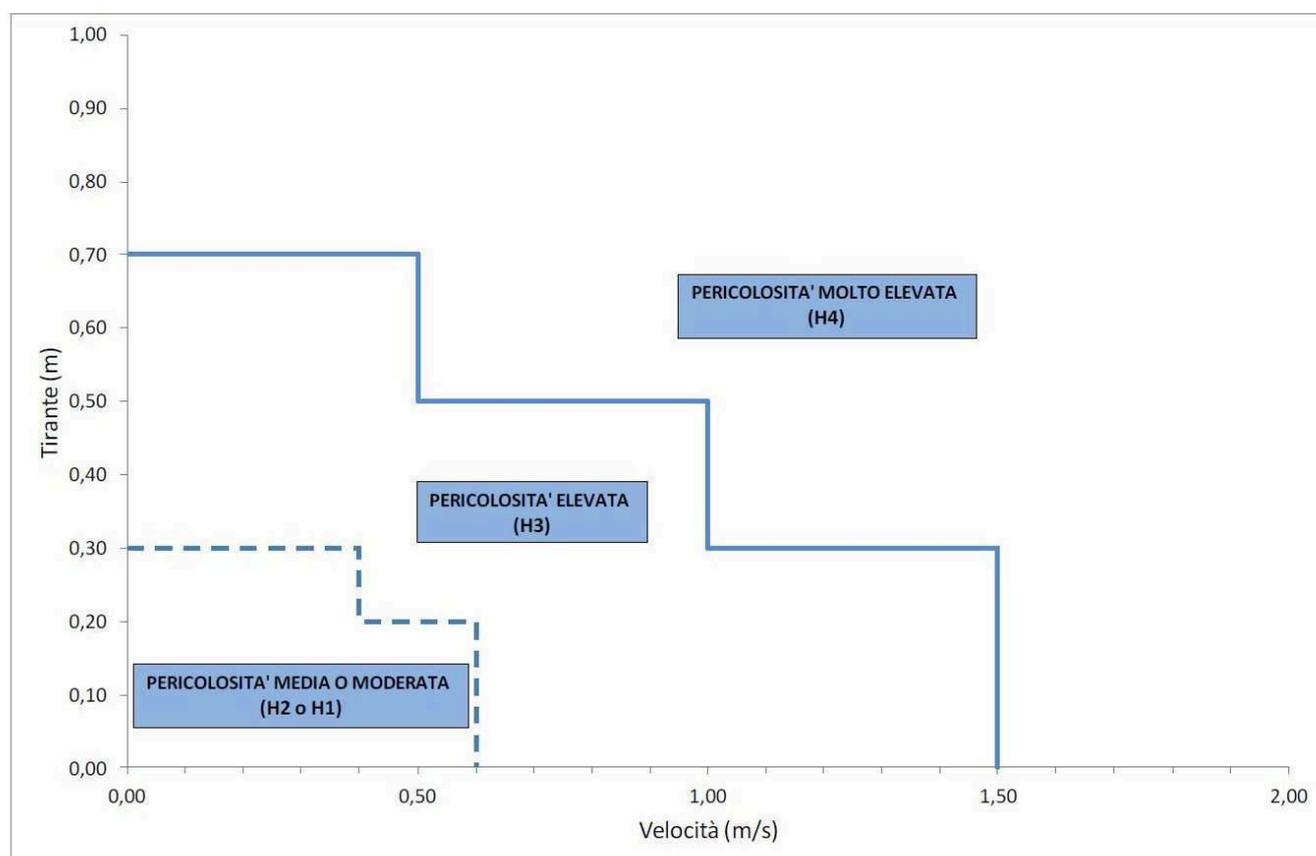
I dati utili all'individuazione delle pericolosità idraulica all'interno delle aree allagate, si ottengono dall'insieme dei valori dei battenti idrici e delle velocità dei flussi, calcolati in tutte le celle del modello planimetrico in funzione del tempo, durante la simulazione del transito della piena di progetto.

Zonazione della pericolosità

Si individuano per una serie di punti significativi del modello planimetrico, scelti nelle posizioni e con densità opportune rispetto alle caratteristiche delle aree ed all'uso del suolo, la doppia coppia di valori: “battente idrico massimo/velocità di flusso all'istante in cui si verifica il massimo battente” e “velocità massima/battente idrico all'istante in cui si verifica la massima velocità del flusso”.

Per ogni punto si determina la pericolosità idraulica (H), secondo la classificazione stabilita dalla normativa, considerando la coppia di valori “battente/velocità” maggiormente gravosa, rispetto alla casistica rappresentata nel grafico del paragrafo 3.4 dell’Allegato 4 alla DGR IX/2616/2011 sotto riportato.

Dall’esame critico della distribuzione dei predetti punti nelle aree esondabili, si delimitano le zone a diverso livello di pericolosità idraulica.



Zonazione del rischio

Il procedimento seguito è quello stabilito al paragrafo 3.5 dell’Allegato 4 alla DGR IX/2616/2011, sotto riportato.

Partendo dalle aree a diversa pericolosità idraulica di cui al precedente punto, si procede a una suddivisione in zone a diverso livello di rischio attuale e potenziale (ossia conseguente a eventuali successive utilizzazioni delle aree), la cui quantificazione è effettuata mettendo in relazione la pericolosità (H), l’entità degli elementi a rischio - o danno potenziale - (E) e la vulnerabilità degli stessi (V) secondo la relazione di natura qualitativa:

$$R = H \times E \times V$$

Le classi del danno potenziale sono determinate in funzione degli elementi a rischio contenuti. Si veda in proposito la seguente tabella:

<i>DANNO POTENZIALE</i>	<i>ELEMENTI A RISCHIO</i>
<i>Grave (E4)</i>	<i>Centri urbani, beni architettonici, storici, artistici, insediamenti produttivi, principali infrastrutture viarie, servizi di elevato valore sociale</i>
<i>Medio (E3)</i>	<i>Aree a vincolo ambientale e paesaggistico, aree attrezzate di interesse comune, infrastrutture viarie secondarie</i>
<i>Moderato (E2)</i>	<i>Aree agricole di elevato pregio (vigneti, frutteti)</i>
<i>Basso (E1)</i>	<i>Seminativi</i>

Ponendo (a favore di sicurezza) la vulnerabilità pari a 1, il rischio idraulico deriva dall'intersezione di pericolo e danno potenziale, come di seguito riportato:

	<i>H4</i>	<i>H3</i>	<i>H2</i>	<i>H1</i>
<i>E4</i>	<i>R4</i>	<i>R4</i>	<i>R2</i>	<i>R2</i>
<i>E3</i>	<i>R3</i>	<i>R3</i>	<i>R2</i>	<i>R1</i>
<i>E2</i>	<i>R2</i>	<i>R2</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>
<i>E1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>	<i>R1</i>

Casi particolari

- Nel caso in cui si ottenga dalla modellazione una riduzione delle aree esondabili rispetto alla mappatura del PGRA, si procede secondo i seguenti criteri:
 - se le aree perimetrate nel PGRA non risultano esondabili e non sono edificate, non si valuta il rischio, poiché si applicano ad esse le norme del PAI per le aree interessate da alluvioni poco frequenti P2/M;
 - per le aree edificate classificate a rischio R4 nella cartografia del PGRA, si procede ad una valutazione di tipo qualitativo che consideri i vari aspetti specifici locali inerenti la difesa idraulica (tipologia, consistenza e vulnerabilità degli argini, franco idraulico della piena rispetto alla sommità degli argini, distanza dell'area dal corso d'acqua, quota del piano terra dell'area rispetto al livello della piena, ecc.) per la valutazione della pericolosità e del rischio.

- Negli ambiti di trasformazione, si valuta sia il rischio potenziale, sulla base delle previsioni urbanistiche specificate dall'ufficio comunale, sia il rischio attuale, sulla base dell'effettivo uso del suolo in essere. Nelle carte del rischio è rappresentato nelle planimetrie, con l'idoneo retino, il rischio potenziale, mentre per ciascuna area è specificato, con apposita legenda, il danno attuale.

5. DOCUMENTI ILLUSTRATIVI DELLO STUDIO IDRAULICO

Per ciascun ambito territoriale, si illustrano, in una specifica relazione idrologica e idraulica, i dati acquisiti ed i risultati delle analisi e delle elaborazioni compiute durante lo svolgimento dello studio secondo il procedimento spiegato nel precedente capitolo.

Nella parte dedicata all'analisi idrologica, si riportano, in sintesi, i dati del PAI e degli studi di aggiornamento del quadro conoscitivo dell'Autorità di Bacino, per gli ambiti del PGRA, specificandone le modalità di utilizzo nel calcolo della modellazione idraulica. Per gli ambiti non interessati dal PGRA, oppure ove necessario, come nel caso dei torrenti Solda, Canale e Mandolossa, si riportano le elaborazioni idrologiche svolte per determinare gli idrogrammi delle piene di progetto, con la relativa cartografia.

Nelle relazioni idrauliche si allegano gli schemi geometrici dei corsi d'acqua e delle strutture interferenti, e gli schemi planimetrici di configurazione delle aree di allagamento, con l'identificazione dei collegamenti idraulici impostati nel modello e la specifica dei vari parametri e coefficienti introdotti nel calcolo.

Dalla grande quantità di risultati ottenuti dal programma di modellazione, si estraggono e si riportano quelli più significativi ed utili ai fini dello studio. Poiché la modellazione è eseguita in regime di moto vario, si allegano le tabelle e gli schemi grafici dei profili delle piene, involucro dei massimi livelli in ciascuna sezione. Si allegano inoltre gli schemi planimetrici della massima espansione delle acque nelle aree esondabili, durante l'evento di riferimento, e delle direzioni più significative dei flussi. I dati relativi al funzionamento idraulico degli sfioratori e delle altre strutture di collegamento dei tronchi fluviali con le aree a flusso 2D, sono rappresentati in forma grafica e tabellare.

La cartografia di sintesi dello studio, relativa a ciascun ambito territoriale studiato, è composta dalle carte tematiche su base CTR, elencate nel seguito:

- Perimetrazione delle aree esondabili e mappatura del battente
- Perimetrazione delle aree esondabili e mappatura delle velocità dei flussi
- Zonazione della pericolosità idraulica
- Zonazione del rischio idraulico

6. RELAZIONE DI CONSULENZA SCIENTIFICA

**Relazione descrittiva nell'ambito della consulenza
scientifica relativa a:**

**Approfondimenti sull'utilizzo del software HEC-
RAS: basi teoriche del moto stazionario e del
moto vario, uso dei coefficienti, problemi
d'instabilità, messaggi di avvertimento**

Responsabile:

Dott. Ing. Francesca Berteni

Novembre 2017

Premessa

La consulenza scientifica è stata richiesta dall'Ing. Giuseppe Rossi nell'ambito dell'incarico ricevuto dal Comune di Brescia per l'esecuzione di uno studio idraulico per la valutazione dettagliata delle condizioni di pericolosità e rischio locali, in alcuni ambiti del territorio comunale, relativo al procedimento di adeguamento della componente geologica del PGT al PAI coordinato con il PGRA, ai sensi del Titolo V delle Norme di Attuazione del PAI.

L'obiettivo è stato quello di approfondire alcuni aspetti riguardanti la versione 5.0.3 del software HEC-RAS (<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>), sviluppato dal Centro d'ingegneria idrologica del corpo degli ingegneri statunitense (US Army Corps of Engineers) per effettuare studi idrodinamici monodimensionali e bidimensionali di reti di canali naturali e artificiali.

Le tematiche analizzate nel dettaglio riguardano:

- basi teoriche del moto stazionario e del moto vario in HEC-RAS;
- l'applicazione della legge di efflusso nello sfioro di acqua da una struttura laterale (*lateral structure*), con particolare attenzione all'applicazione del coefficiente di efflusso;
- uso del coefficiente di efflusso nei ponti;
- utilizzo dei coefficienti di contrazione ed espansione;
- determinazione del coefficiente per il calcolo della perdita energetica all'ingresso e all'uscita di un canale sotterraneo;
- significati dei principali messaggi di avvertimento (*Warnings*) e note tecniche (*Notes*) dopo il processo di simulazione e possibili soluzioni per la loro rimozione;
- analisi dei principali problemi d'instabilità del modello idraulico.

Indice

1	BASI TEORICHE DEL MOTO STAZIONARIO E DEL MOTO VARIO IN HEC-RAS	19
1.1	MOTO STAZIONARIO	19
1.2	MOTO VARIO MONODIMENSIONALE (1D)	22
1.3	MOTO VARIO BIDIMENSIONALE (2D).....	25
2	COEFFICIENTE DI EFFLUSSO NELLE STRUTTURE LATERALI	30
2.1	LA LEGGE DI EFFLUSSO.....	30
2.2	DETERMINAZIONE DEL COEFFICIENTE DI EFFLUSSO E DEL COEFFICIENTE DI PORTATA.....	32
3	COEFFICIENTE DI EFFLUSSO NEI PONTI.....	37
4	COEFFICIENTE DI CONTRAZIONE ED ESPANSIONE	39
5	COEFFICIENTE PER IL CALCOLO DELLA PERDITA ENERGETICA ALL'INGRESSO E ALL'USCITA DI UN CANALE SOTTERRANEO	43
6	PRINCIPALI PROBLEMI D'INSTABILITÀ DEL MODELLO IDRAULICO	45
6.1	SEZIONI	45
6.2	PASSO TEMPORALE DI CALCOLO	46
6.3	STRUTTURE	46
6.4	INDICE DI MANNING	47
6.5	FLUSSO IN CONDIZIONI DI MAGRA E CONDIZIONI INIZIALI.....	47
6.6	TORRENTI RIPIDI E REGIME DI MOTO MISTO	47
6.7	VARIAZIONI DI QUOTA DEL FONDO ALVEO	47
6.8	PONTI E CANALI SOTTERRANEI	47
6.9	HTAB PARAMETERS (HYDRAULIC TABLE PARAMETERS).....	48
7	MESSAGGI DI AVVISO E NOTE TECNICHE	51
7.1	MESSAGGI DI AVVISO	51
7.2	NOTE TECNICHE	55

1 Basi teoriche del moto stazionario e del moto vario in HEC-RAS

1.1 Moto stazionario

Il modello HEC-RAS costruito può essere applicato per effettuare un'analisi in regime di moto stazionario, considerando "stazionario" ogni tratto di fiume caratterizzato da portata costante.

Il profilo della corrente monodimensionale e gradualmente variata lungo canali naturali o artificiali viene ricostruito sulla base dell'equazione dell'energia: l'energia posseduta dalla corrente in una determinata sezione è pari a quella che aveva nella sezione più a monte a meno delle perdite concentrate e distribuite.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_s \quad (1)$$

dove: Z_1 e Z_2 sono le quote geodetiche più basse del fondo alveo in corrispondenza della sezione

1 e della sezione 2 nel canale principale (*main channel invert*)

Y_1 e Y_2 sono i tiranti idrici in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 (*depth of water at cross section*)

V_1 e V_2 sono le velocità medie in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 (*average velocities*)

α_1 e α_2 sono i coefficienti di ragguaglio dell'altezza cinetica in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 (*velocity weighting coefficients*)

g è l'accelerazione di gravità sezione 2 (*gravitational acceleration*)

h_s sono le perdite di carico continue e concentrate tra la sezione 1 e la sezione 2 (*energy head loss*)

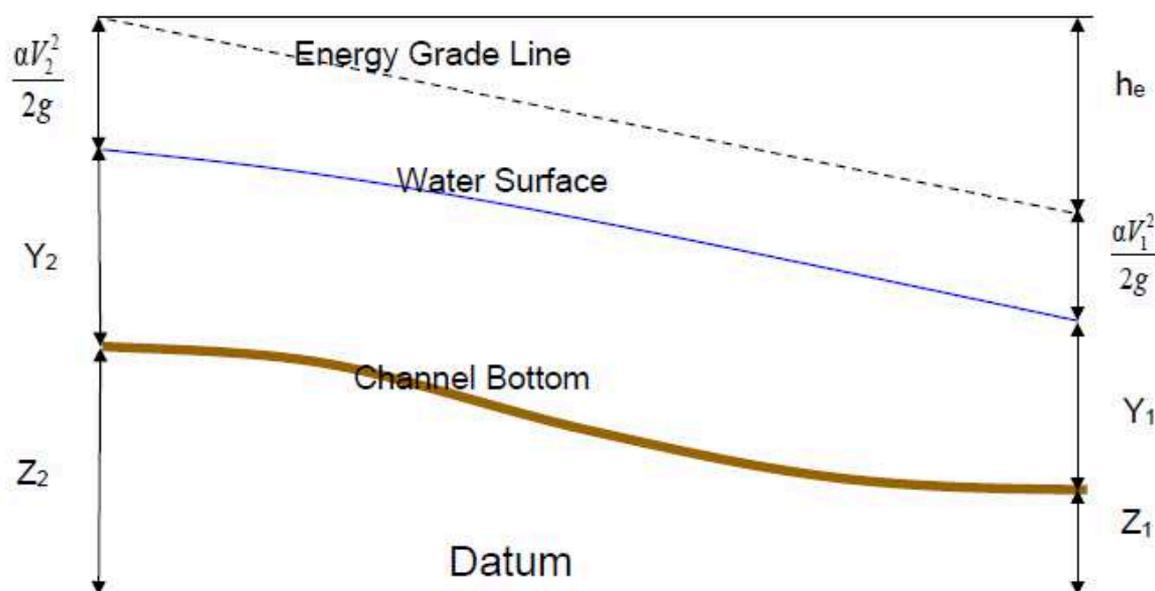


Figura 1.1 – Rappresentazione dei termini dell'equazione dell'energia tratta dal manuale di HEC-RAS

Il termine che esprime la perdita di carico (h_e) tra una sezione trasversale e quella consecutiva dipende dalle perdite continue dovute all'attrito, alle pareti e sul fondo del canale, oltre che alle perdite localizzate di imbocco e sbocco, a loro volta determinate dalla variazione della geometria delle sezioni trasversali lungo il corso d'acqua.

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (2)$$

dove: L è la lunghezza media del tratto compreso tra la sezione 1 e la sezione 2. Viene calcolata

facendo la media pesata delle distanze lungo il canale principale e lungo ciascuna delle

due aree golenali; tale media viene pesata sulla portata (nel canale principale e nelle due

aree golenali). Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-3 del "Hydraulic Reference Manual"

S_f è la pendenza della linea dell'energia e per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag.

2-9 del "Hydraulic Reference Manual"

C è il coefficiente di espansione o contrazione e per ulteriori approfondimenti si rimanda

a pag. 2-10 del "Hydraulic Reference Manual"

L'equazione dell'energia viene risolta con un metodo di calcolo noto come “*procedura standard step*”. Il metodo prevede di stimare inizialmente l'altezza della corrente nella sezione a monte (a valle se si tratta di corrente veloce) di una sezione nota; con il valore stimato è possibile valutare in prima approssimazione le perdite di energia e risolvere l'equazione dell'energia per calcolare l'altezza della corrente della sezione di monte (di valle se si tratta di corrente veloce). Quest'ultima viene quindi confrontata col valore che era stato assunto in fase iniziale e, se dalla comparazione la differenza tra i due valori è minore o uguale di 0,003 m (o se è stata raggiunta la tolleranza stabilita dall'utente), si può affermare di aver trovato il nuovo tirante idrico. In caso contrario, il procedimento descritto verrà ripetuto in maniera iterativa fino al soddisfacimento della condizione precedentemente specificata. Alla seconda iterazione, il valore iniziale dell'altezza della corrente a monte viene corretto per considerare il 70% dell'errore compiuto nella prima iterazione. Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-11 del “Hydraulic Reference Manual”.

Quando la corrente attraversa uno stato critico, l'equazione dell'energia non è più applicabile perché il passaggio da corrente lenta a corrente veloce (o viceversa) è una variazione rapida e quindi non vale più l'ipotesi di corrente gradualmente variata. Questa situazione si verifica quando c'è un significativo cambio di pendenza del canale, in corrispondenza di ponti o altre strutture idrauliche come le traverse, e in presenza di nodi idraulici (*junction*). In alcuni casi vengono usate le apposite equazioni (come quelle per gli stramazzi), mentre in altri casi è necessario considerare l'equazione del moto (equazione globale dell'equilibrio dinamico) applicata a un volume di controllo compreso tra la sezione 1 e la sezione 2:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x \quad (3)$$

dove: P_1 e P_2 sono le forze di superficie in corrispondenza della sezione 1 e della sezione 2 nel canale principale (*hydrologic pressure force*)

W_x è la forza peso del volume di controllo in direzione x (*force due to the weight of water*)

F_f è la forza d'attrito tra la sezione 1 e la sezione 2 (*force due to the external friction losses*)

Q è la portata (*discharge*)

ρ è la densità dell'acqua (*density of water*)

ΔV_x è la variazione di velocità dalla sezione 2 alla sezione 1, in direzione x (*change of velocity*)

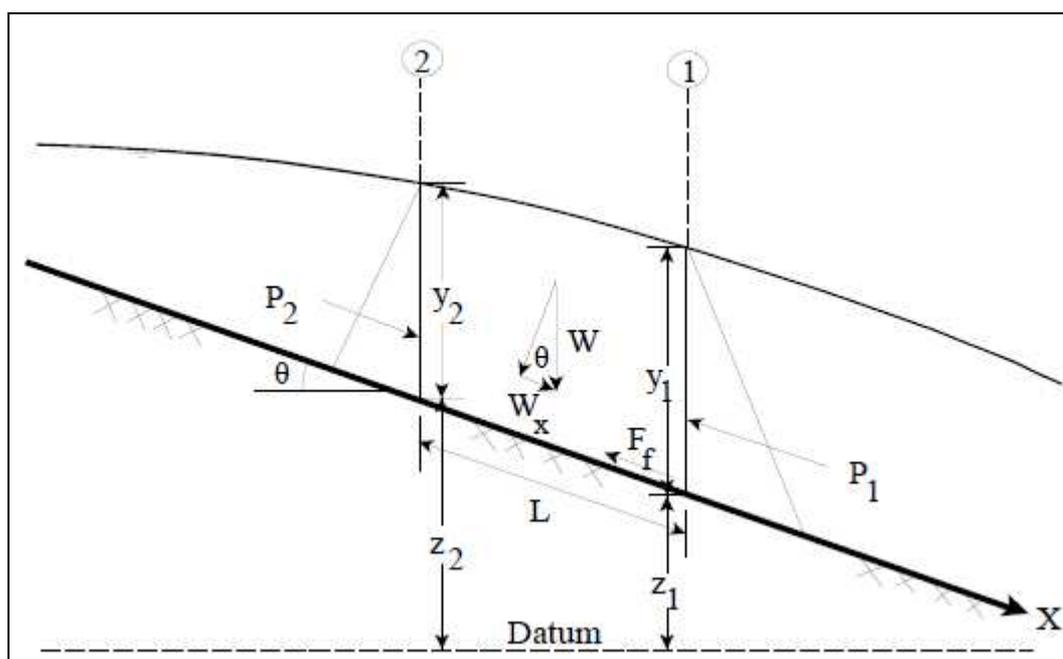


Figura 1.2 – Applicazione dell'equazione globale dell'equilibrio dinamico tratta dal manuale di HEC-RAS

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-15 del “Hydraulic Reference Manual”.

Infine, vengono di seguito elencati i limiti che stanno alla base del codice di calcolo in una simulazione in regime di moto stazionario:

- flusso stazionario;
- flusso gradualmente variato (ad eccezione dei punti in corrispondenza di strutture idrauliche e di passaggio di corrente da veloce a lenta o da lenta a veloce, dove si ricorre all'equazione del moto o ad altre equazioni);
- flusso monodimensionale;
- bassa pendenza del canale (non superiore a 1:10).

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-20 del “Hydraulic Reference Manual”.

1.2 Moto vario monodimensionale (1D)

Le leggi fisiche che governano il movimento dell'acqua nei corpi idrici sono il *principio di conservazione della massa* (equazione di continuità) e il *principio di conservazione della quantità di moto* (equazione globale dell'equilibrio dinamico). Queste leggi sono espresse matematicamente in forma di equazioni differenziali alle derivate parziali.

È di seguito riportata l'immagine del volume di controllo a cui fanno riferimento l'equazione di continuità e l'equazione di conservazione della quantità di moto.

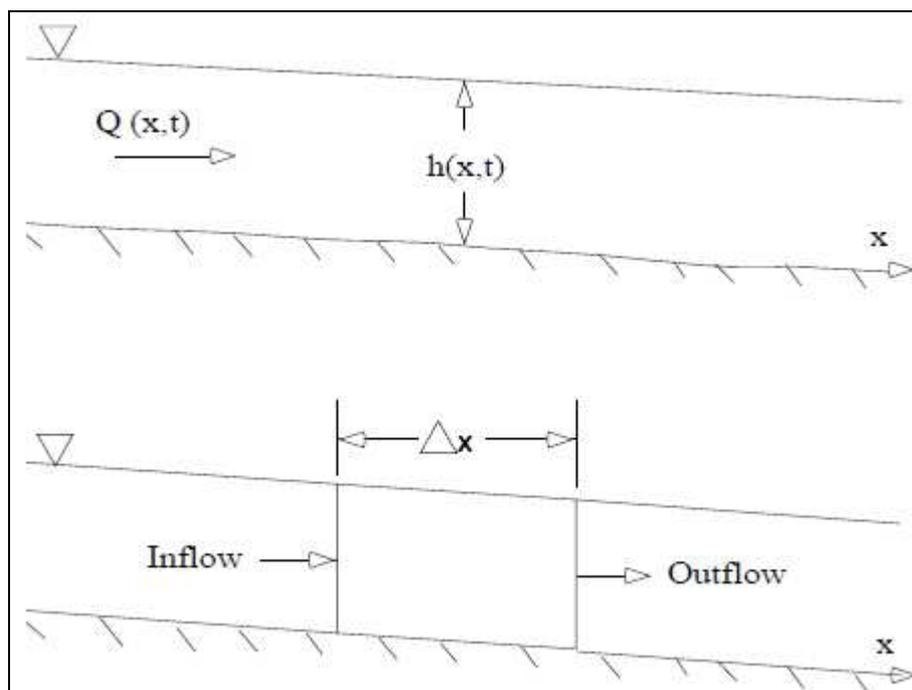


Figura 1.3 – Rappresentazione del volume di controllo elementare per la derivazione dell'equazione di continuità e di conservazione della quantità di moto, tratta dal manuale di HEC-RAS

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_l = 0 \quad (4)$$

dove: A_T è l'area bagnata nel punto centrale del volume di controllo, comprensiva del canale

principale e delle aree golenali e di accumulo laterali

Q è portata nel punto centrale del volume di controllo

q_l è la portata in ingresso lateralmente al volume di controllo per unità di lunghezza

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-22 del "Hydraulic Reference Manual".

Equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (5)$$

dove: Q è portata

g è l'accelerazione di gravità

S_f è la pendenza della linea dell'energia

$\frac{\partial z}{\partial x}$ è la pendenza della superficie libera dell'acqua

A è l'area bagnata della sezione trasversale

V è la velocità del fluido nella sezione trasversale

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-23 del “Hydraulic Reference Manual”.

La Figura 1.4 illustra l'interazione esistente tra il canale (*channel*) e aree golenali laterali (*floodplain*) in condizioni di moto vario unidimensionale (1D). Quando il livello dell'acqua all'interno del canale aumenta, essa incomincia ad invadere le golene laterali e a riempire le aree di stoccaggio (*storage areas*) disponibili. L'acqua che ha raggiunto le golene laterali inizia quindi a muoversi verso valle, normalmente seguendo un percorso più breve rispetto a quello del canale principale. Viceversa, quando il livello idrico si riduce, l'acqua si sposta dalle aree golenali verso il canale.

Nella situazione descritta il flusso è di tipo monodimensionale poiché la direzione seguita dall'acqua nel canale principale e nelle aree golenali circostanti è la medesima; pertanto, il “floodplain” può essere considerato come un canale separato e indipendente dal “channel” e a ciascuno di essi verranno associate diverse equazioni alle derivate parziali di conservazione della massa e della quantità di moto.

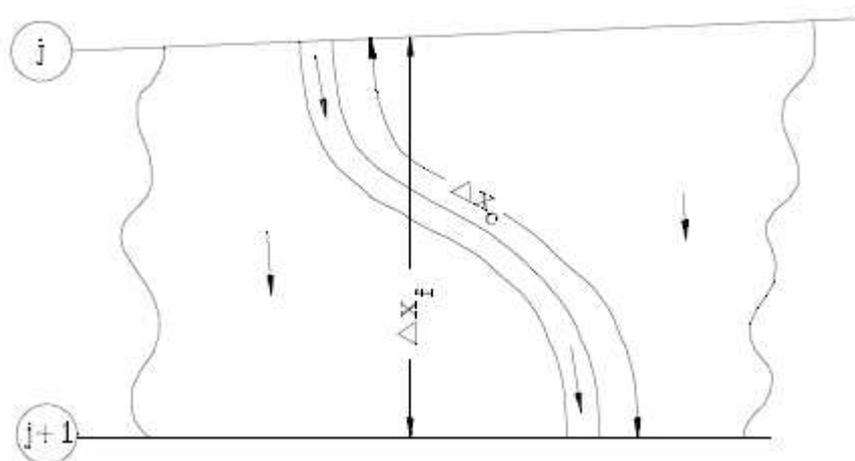


Figura 1.4 – Flusso dell'acqua nel canale principale (*channel*) e nelle aree golenali laterali (*floodplain*) [immagine tratta dal manuale di HEC-RAS]

Tutte le equazioni differenziali alle derivate parziali, vengono approssimate dal codice di calcolo utilizzando un metodo implicito alle differenze finite (*implicit finite difference scheme*) e quindi vengono risolte numericamente secondo le metodologie descritte nel manuale di HEC-RAS.

In corrispondenza di ogni punto in cui sono risolte le equazioni, il software ipotizza dei valori iniziali di calcolo e controlla se la differenza tra il livello dell'acqua calcolato e il suo valore precedente siano minori oppure no della tolleranza della soluzione numerica. In caso affermativo, significa aver trovato la giusta soluzione per quel passo temporale e quindi si può passare al successivo "time step". In caso negativo invece il codice di calcolo procede iterativamente facendo una nuova stima delle derivate e risolvendo ancora le equazioni.

Per ulteriori approfondimenti in merito all'applicazione del moto vario in 1D, si rimanda al paragrafo "*Application of the 1D Unsteady Flow Equations within HEC-RAS*" a pag. 2-28 del "Hydraulic Reference Manual".

1.3 Moto vario bidimensionale (2D)

Anche in questo caso, le leggi fisiche che governano il movimento dell'acqua nei corpi idrici sono il *principio di conservazione della massa* (equazione di continuità) e il *principio di conservazione della quantità di moto* (equazione globale dell'equilibrio dinamico).

Tuttavia, poiché le equazioni di Navier-Stokes descrivono il moto dei fluidi in tre dimensioni, sono state introdotte delle semplificazioni e, pertanto, le equazioni che sono di seguito riportate sono definite

"*Shallow Water (SW) equations*". Le semplificazioni prevedono che il fluido sia incompressibile, la densità uniforme, la distribuzione delle pressioni idrostatica, che ci sia un'approssimazione del moto turbolento usando la viscosità turbolenta e che la lunghezza della scala verticale sia molto minore rispetto a quella orizzontale; quest'ultimo elemento implica che la velocità verticale sia molto piccola.

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (6)$$

dove: u e v sono le componenti del vettore velocità $V = (u, v)$ rispettivamente nella direzione x e y

H e h sono rispettivamente la quota piezometrica (*water surface elevation*) e il tirante

idrico o altezza piezometrica (*water depth*), come mostrato in Figura 1.5

Q è un termine che serve per indicare la presenza di eventuali flussi in ingresso o in uscita dal sistema (Ω), ad esempio per la presenza di pompe. Esso può anche indicare qualunque flusso che attraversa il fondo della superficie S , come acqua che si infiltra, o che attraversa la sua estremità superiore, come pioggia in ingresso o acqua che evapora (*source/sink flux term*)

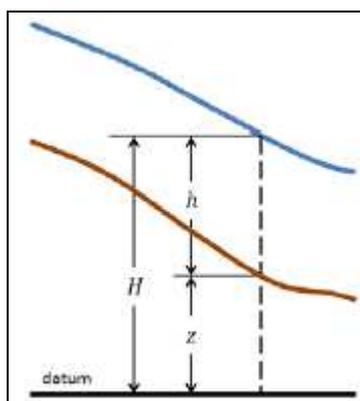


Figura 1.5 – Rappresentazione grafica della quota piezometrica (H), dell'altezza piezometrica (h) e della quota geodetica (z) [immagine tratta dal manuale di HEC-RAS]

La legge fisica utilizzata da HEC-RAS è il seguente integrale dell'equazione di continuità:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS + Q = 0 \quad (7)$$

dove: Ω è lo spazio tridimensionale occupato dal fluido (è quindi il volume finito della cella

considerata nel “*sub-grid bathymetry approach*”)

S è la superficie che delimita lo spazio tridimensionale occupato dal fluido

\mathbf{n} è il vettore normale

Q è un termine che serve per indicare la presenza di eventuali flussi in ingresso o in uscita dal sistema (Ω), ad esempio per la presenza di pompe. Esso può anche indicare qualunque flusso che attraversa il fondo della superficie S , come acqua che si infiltra, o che attraversa la sua estremità superiore, come pioggia in ingresso o acqua che evapora (*source/sink flux term*)

L'integrale dell'equazione di continuità è adoperato dal codice di calcolo per seguire un approccio definito “*sub-grid bathymetry approach*” [Casulli, 2008], nel quale il volume Ω occupato dal fluido è quello di una cella della rete (*grid*) e l'integrale viene risolto servendosi della

topografia sottostante. Spesso la topografia fornita dall'utente presenta una risoluzione troppo elevata per essere usata direttamente da HEC-RAS nel modello numerico. È quindi necessario ricorrere ad una rete (*grid*) più grossolana per produrre una simulazione più fluida della variabilità spaziale del livello raggiunto dall'acqua, sebbene le informazioni topografiche più dettagliate non sono trascurate in fase computazionale. Infatti l'approccio proposto da Casulli, prevede di utilizzare una rete (*grid*) computazionale relativamente grossolana, unitamente ad una scala d'informazione più fine fornita dalla topografia sottostante. Quindi, per trovare una soluzione numerica, l'integrale dell'equazione di conservazione della massa viene discretizzato servendosi di una tecnica ai volumi finiti, mentre il trasporto della massa fluida tiene in considerazione la scala topografica più dettagliata all'interno di ciascuna cella discreta.

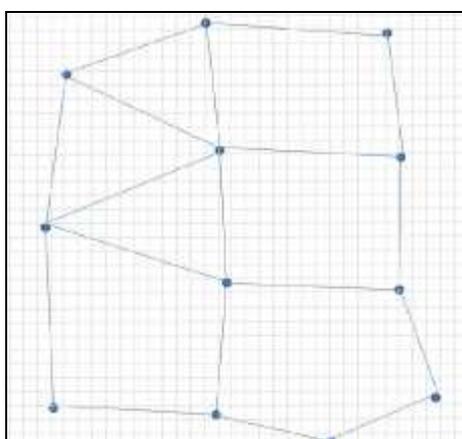


Figura 1.6 – Rappresentazione grafica tratta dal manuale di HEC-RAS della rete più fitta (*fine grid*) in colore grigio e della rete di calcolo (*computational grid*) in colore blu

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-53 del “Hydraulic Reference Manual”.

Per quanto riguarda invece la conservazione della quantità di moto, si riportano di seguito le espressioni che la caratterizzano:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (8)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (9)$$

dove: u e v sono le componenti del vettore velocità $V = (u, v)$ rispettivamente nella direzione x e y

g è il termine legato alla gravità (*gravity*), ovvero l'accelerazione gravitazionale

v_t è il coefficiente di viscosità turbolenta in direzione orizzontale (*horizontal eddy viscosity coefficient*)

ζ_f è il coefficiente di attrito sul fondo (*bottom friction coefficient*)

f è il parametro di Coriolis (*Coriolis parameter*)

H è la quota piezometrica (*water surface elevation*)

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-55 del “Hydraulic Reference Manual”.

In condizioni ben specifiche, ovvero quando i termini legati alla gravità e all’attrito sul fondo sono dominanti e il termine viscoso, la non stazionarietà e l’avvezione sono trascurabili, le equazioni del moto possono essere sostituite da una sola equazione semplificata e la cui forma è definita “*Diffusion-Wave Form*”. La diretta sostituzione di quest’ultima equazione nell’equazione di conservazione della massa, permette di ottenere la “*Diffusion Wave Approximation of the Shallow Water (DSW) equations*”.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-58 del “Hydraulic Reference Manual”.

Per riuscire ad applicare i metodi numerici che risolvono le equazioni, il dominio viene ulteriormente suddiviso creando un’altra rete di poligoni che non si sovrappone a quella preesistente (cfr. Figura 1.7).

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-60 del “Hydraulic Reference Manual”.

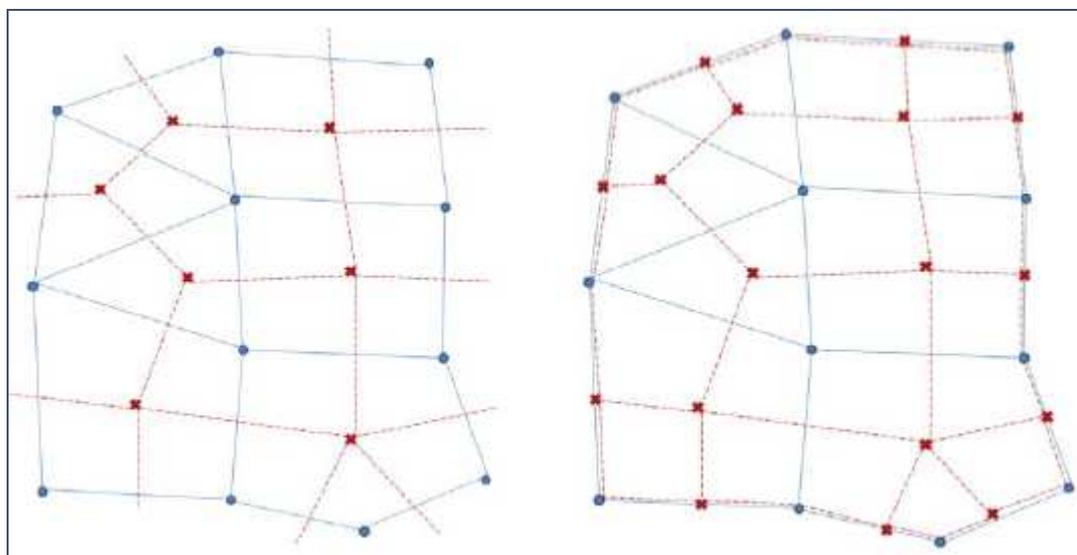


Figura 1.7 – Rappresentazione grafica tratta dal manuale di HEC-RAS della rete di poligoni (celle) esistente (*grid nodes*) in blu e di quella inserita successivamente (*dual grid nodes*) in rosso

I metodi numerici utilizzati dal codice di calcolo prevedono la creazione di uno schema discretizzato che combini differenze finite (*Finite Difference Approximations*) e volumi finiti approssimati (*Finite Volume Approximations*). In particolare, nel manuale HEC-RAS sono descritti due metodi numerici che risolvono la *DSW Equation* (1° metodo) e le *SW Equations* (2° metodo).

Come precisato a pag. 2-51 del “Hydraulic Reference Manual”, la procedura computazionale seguita è analoga a quella illustrata nel caso di moto vario monodimensionale. In corrispondenza di ogni cella in cui viene applicato l’algoritmo risolutivo per risolvere le equazioni considerando volumi finiti, il software ipotizza dei valori iniziali di calcolo e controlla se la differenza tra il livello dell’acqua calcolato e il suo valore precedente siano minori oppure no della tolleranza della soluzione numerica. In caso affermativo, significa aver trovato la giusta soluzione per quel passo temporale e quindi si può passare al successivo “time step”. In caso negativo invece il codice di calcolo procede iterativamente facendo una nuova stima delle derivate e risolvendo ancora le equazioni applicando l’algoritmo risolutivo.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 2-62 del “Hydraulic Reference Manual”.

2 Coefficiente di efflusso nelle strutture laterali

2.1 La legge di efflusso

Con il software HEC-RAS è possibile inserire all'interno di un modello idraulico una o più strutture laterali (*lateral structures*), che consentono il trasferimento dell'acqua da un corpo idrico ad un'area di accumulo posizionata lateralmente ad esso oppure ad un altro corpo idrico. È di seguito riportata un'immagine esemplificativa di una struttura di sfioro laterale (*Lateral Weir*):

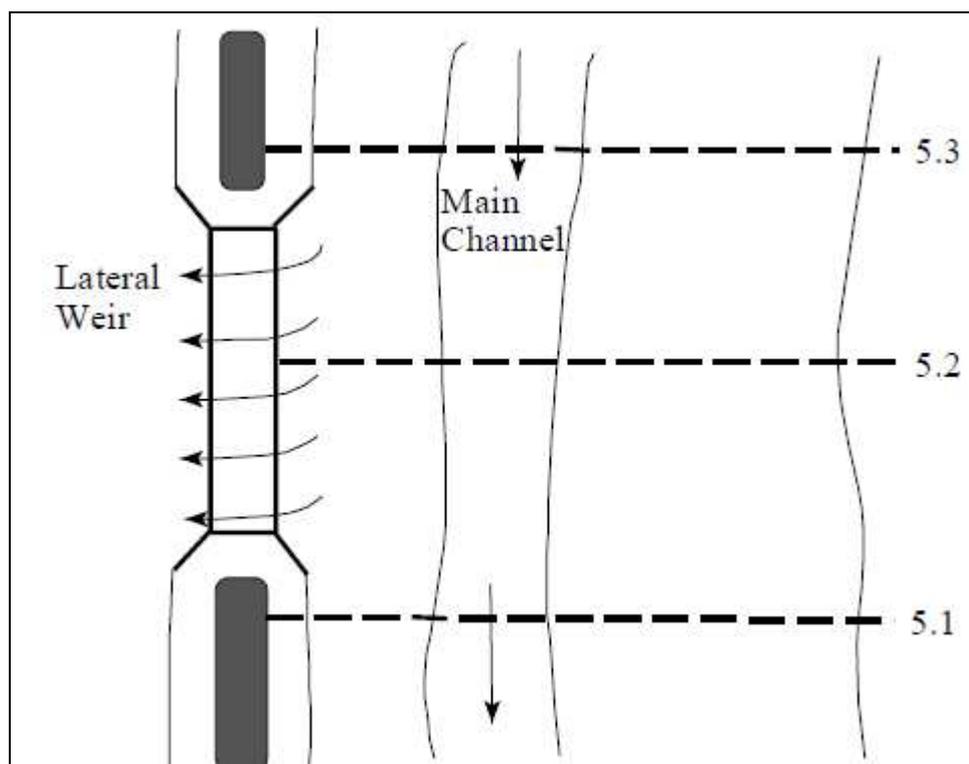


Figura 2.1 – Immagine esemplificativa di uno sfioratore laterale tratta dal manuale di HEC-RAS

La legge di efflusso che regola il funzionamento di una struttura laterale, come ad esempio lo sfioratore laterale, è la stessa adoperata dal programma per le strutture in linea col corso d'acqua (*inline structure*).

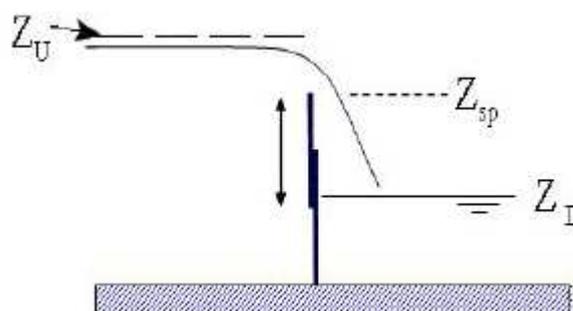


Figura 2.2 – Immagine esplicativa tratta dal manuale di HEC-RAS

$$Q = C_{weir} W H^{3/2} \quad (10)$$

dove: C_{weir} è il coefficiente di efflusso (*weir coefficient*)

W è la larghezza della soglia sfiorante

H è l'energia di monte sopra la soglia di sfioro ($Z_U - Z_{sp}$)

$$C_{weir} = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} \quad (11)$$

dove: C_d è il coefficiente di portata (*discharge coefficient*)

$g = 9,806 \frac{m}{s^2}$ è l'accelerazione di gravità

Tuttavia l'applicazione di questa legge di efflusso presuppone che il fondo della soglia sfiorante sia parallelo al pelo libero dell'acqua in corrispondenza di essa. Poiché tale circostanza non è sempre soddisfatta in presenza di una struttura laterale, il programma si serve della legge più generale che viene costruita considerando la pendenza della soglia sfiorante diversa rispetto a quella del pelo libero dell'acqua. È di seguito riportata l'espressione più generica della legge di efflusso unitamente ai passaggi matematici compiuti per ottenerla.

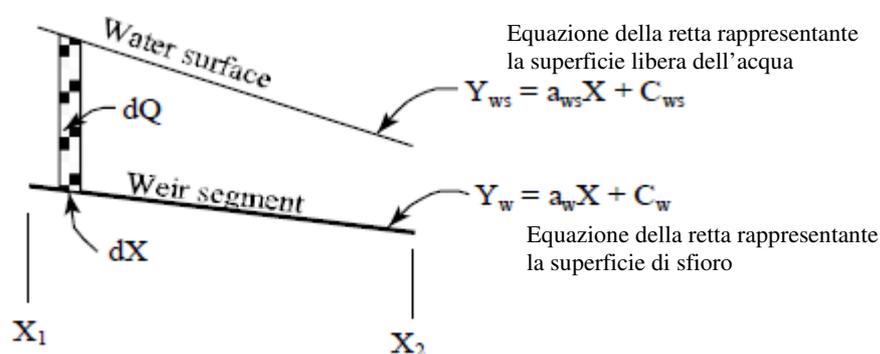


Figura 2.1 – Immagine esplicativa tratta dal manuale di HEC-RAS

$$dQ = C_{weir}(y_{ws} - y_w)^{3/2} dx$$

$$dQ = C_{weir}(a_{ws}x + C_{ws} - a_w x - C_w)^{3/2} dx$$

$$dQ = C_{weir}([(a]_{ws} - a_w)x + [(C]_{ws} - C_w)]^{3/2} dx$$

Ponendo $a_1 = a_{ws} - a_w$ e $C_1 = C_{ws} - C_w$

$$\int_{x_1}^{x_2} dQ = C_{weir} \int_{x_1}^{x_2} (a_1 x + C_1)^{3/2} dx$$

$$Q_{x_1-x_2} = \frac{2C_{weir}}{(5a_1) \left((a_1 x_2 + C_1)^{5/2} - (a_1 x_1 + C_1)^{5/2} \right)} \quad (12)$$

Nel caso di $a_1 = 0$, si ricade nella situazione in cui la pendenza della soglia sfiorante è uguale a quella del pelo libero dell'acqua e pertanto HEC-RAS si servirà dell'equazione (10).

2.2 Determinazione del coefficiente di efflusso e del coefficiente di portata

Ogni struttura laterale, richiede quindi l'inserimento di un coefficiente di efflusso C_{weir} . Purtroppo la letteratura offre molti valori di tale coefficiente solamente per le "Inline Structure", mentre è più difficile trovare indicazioni per le "Lateral Structure". L'unica certezza è che il coefficiente di efflusso deve avere un valore inferiore nella "Lateral Structure" rispetto alla "Inline Structure", per riuscire così considerare le perdite di energia associate al cambio di direzione dell'acqua rispetto a quella seguita dal corpo idrico principale.

Il manuale HEC-RAS sottolinea inoltre l'importanza di usare un coefficiente di efflusso molto basso quando si utilizza l'opzione "Lateral Structure" in assenza di argini, strade o depositi di terreno, quando cioè il solo scopo è quello di permettere all'acqua di muoversi da un fiume (regione 1D) ad una zona golenale posizionata lateralmente ad esso (regione 2D). Senza rispettare quest'ultima condizione, si rischia di trasferire un quantitativo eccessivo di acqua nella golenale e di generare problemi d'instabilità. Viene inoltre specificato che per ottenere i migliori risultati, dove possibile, bisognerebbe calibrare il coefficiente di efflusso. Tuttavia poiché nella maggior parte dei casi è molto difficile avere le informazioni necessarie per effettuare la calibrazione, il manuale di HEC-RAS propone la tabella di seguito riportata per indirizzare l'utente verso una scelta ottimale del coefficiente di efflusso:

Argine o strada alti circa 0,9 m dal piano campagna che si comportano come uno stramazzo a larga soglia.

Argine o strada con altezza compresa tra 0,3 m e 0,9 m dal piano campagna che si comportano come uno stramazzo a larga soglia, ma vengono facilmente sommersi dall'acqua.

Terreno naturale con altezza compresa tra 0,3 m e 0,9 m che funge da barriera. Non si comporta come uno stramazzo, ma l'acqua deve passare sopra di esso per raggiungere la zona golenale.

Non ci sono argini o strade né depositi di terreno che possono ostacolare la fuoriuscita dell'acqua dal corpo idrico verso l'area golenale circostante. Pertanto la struttura laterale non sarà sopraelevata rispetto al piano campagna.

What is being modeled with the Lateral Structure	Description	Range of Weir Coefficients
Levee/Roadway – 3ft or higher above natural ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow	1.5 to 2.6 (2.0 default) SI Units: 0.83 to 1.43
Levee/Roadway – 1 to 3 ft elevated above ground	Broad crested weir shape, flow over levee/road acts like weir flow, but becomes submerged easily.	1.0 to 2.0 SI Units: 0.55 to 1.1
Natural high ground barrier – 1 to 3 ft high	Does not really act like a weir, but water must flow over high ground to get into 2D flow area.	0.5 to 1.0 SI Units: 0.28 to 0.55
Non elevated overbank terrain. Lat Structure not elevated above ground	Overland flow escaping the main river.	0.2 to 0.5 SI Units: 0.11 to 0.28

Tabella 1 – Tabella tratta dal manuale di HEC-RAS per la scelta del coefficiente C_{weir}

In alternativa, nella letteratura è possibile trovare qualche espressione per determinare il coefficiente di portata C_d sulla base di alcuni parametri noti ed utilizzarlo per calcolare il coefficiente di efflusso con la (10). Si precisa che, a differenza del coefficiente di efflusso (C_{weir}), il coefficiente di portata (C_d) è adimensionale e quindi assume lo stesso valore per diversi sistemi di misura (SI o US).

L'articolo di R. Singh et al (1994) propone il seguente polinomio per stimare il coefficiente di portata C_d nella condizione di corrente lenta (*subcritical flow*) e di struttura laterale avente forma rettangolare.

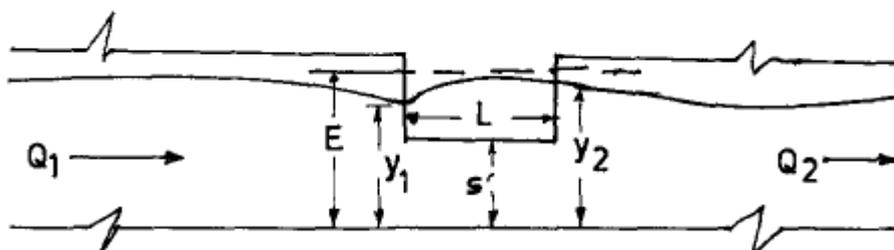


Figura 2.4 – Profilo dell'acqua in presenza di struttura laterale rettangolare in corrente lenta [R. Singh et al., 1994]

$$C_d = 0,33 - 0,18F_1 + 0,49 \frac{s}{y_1} \quad (13)$$

dove: y_1 è il tirante in corrispondenza della sezione immediatamente a monte dello sfioro
 F_1 è il numero di Froude in corrispondenza della sezione immediatamente a monte dello sfioro con tirante y_1
 s è l'altezza del petto dello stramazzo

Per ulteriori approfondimenti si rimanda all'articolo di Singh et al., 1994.

Ponendosi sempre nella condizione di corrente lenta (*subcritical flow*) e di struttura laterale avente forma rettangolare, anche l'articolo di S. M. Borghei et al (1999) fornisce un'equazione per calcolare coefficiente di portata C_d .

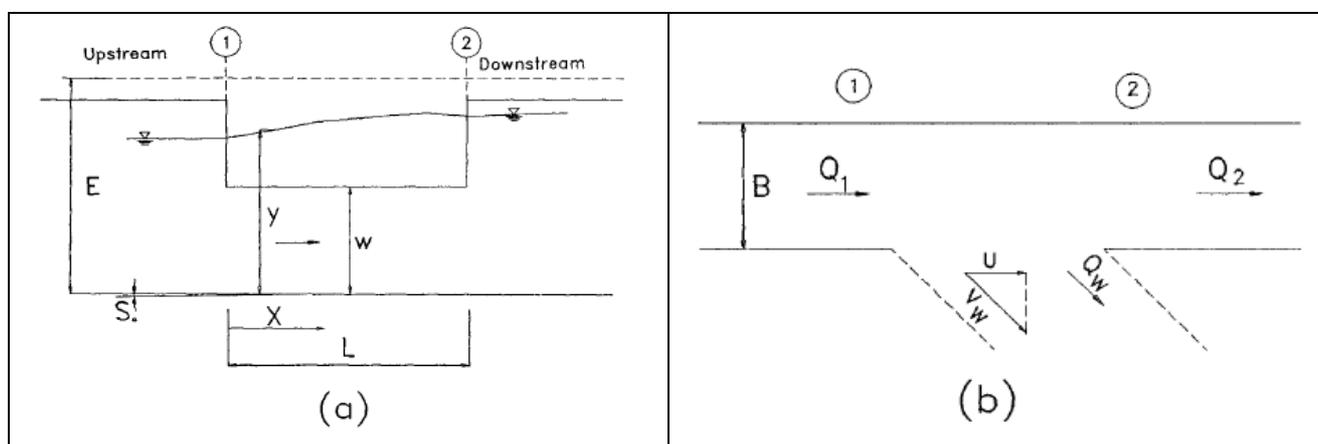


Figura 2.5 – Sfiatore laterale: sezione (a) e pianta (b) [S. M. Borghei et al, 1999]

$$C_d = 0,687 - 0,46F_1 - 0,3\frac{w}{y_1} + 0,06\frac{L}{B} + 1,25\sigma \quad (14)$$

dove: y_1 è il tirante in corrispondenza della sezione immediatamente a monte dello sfioro
 F_1 è il numero di Froude in corrispondenza della sezione immediatamente a monte dello sfioro con tirante y_1
 w è l'altezza del petto dello stramazzo
 L è la lunghezza della soglia sfiorante
 B è la larghezza del canale a monte dello sfioro

Per ulteriori approfondimenti si rimanda all'articolo di Borghei et al., 1999.

Una volta determinato, il coefficiente di efflusso C_{weir} andrà inserito nel punto indicato in Figura 2.6. Si precisa che, nonostante compaia C_d tra parentesi, il software richiede sempre il valore di C_{weir} che varierà a seconda del sistema di misura scelto (SI o US).

The image shows the 'Lateral Weir Embankment' dialog box. The 'Weir Data' section is expanded to show 'Standard Weir Equation Parameters'. The 'Weir Coefficient (Cd)' field is highlighted with a red box and a red arrow. The 'Weir Crest Shape' is set to 'Broad Crested'. The 'Embankment Station/Elevation Table' is visible on the right side of the dialog.

	Station	Elevation
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		

Figura 2.6 – Finestra “Lateral Weir Embankment” del software HEC-RAS

Va specificato inoltre che, se si decide di inserire manualmente il coefficiente di efflusso C_{weir} per simulare uno sfioro dove la struttura laterale non è sopraelevata rispetto al piano campagna (*non-elevated weir*), nella scelta del “Weir Crest Shape” (vedi Figura 2.6) è bene preferire l’opzione “Broad Crested” ed evitare l’alternativa “Zero-Height weir”. Infatti quest’ultima preferenza, sebbene adeguata alla circostanza perché adoperata quando non c’è alcuno stramazzo e l’acqua è libera di muoversi dal corpo idrico all’area golenale circostante, è strettamente legata all’impiego dell’equazione di Hager.

In alternativa all’inserimento manuale del coefficiente di efflusso C_{weir} , HEC-RAS dà la possibilità di ricorrere all’equazione di Hager per le strutture laterali. La legge di efflusso che si utilizza è l’equazione (10) riportata nel paragrafo 2.1; ciò che varia è il coefficiente di efflusso che viene calcolato automaticamente dal codice di calcolo sulla base di alcuni parametri fisici e idraulici. Pertanto, anziché inserire il valore del coefficiente di efflusso nel punto mostrato in Figura 2.6, bisognerà scegliere l’equazione di Hager e specificare i parametri richiesti (cfr Figura 1.7).

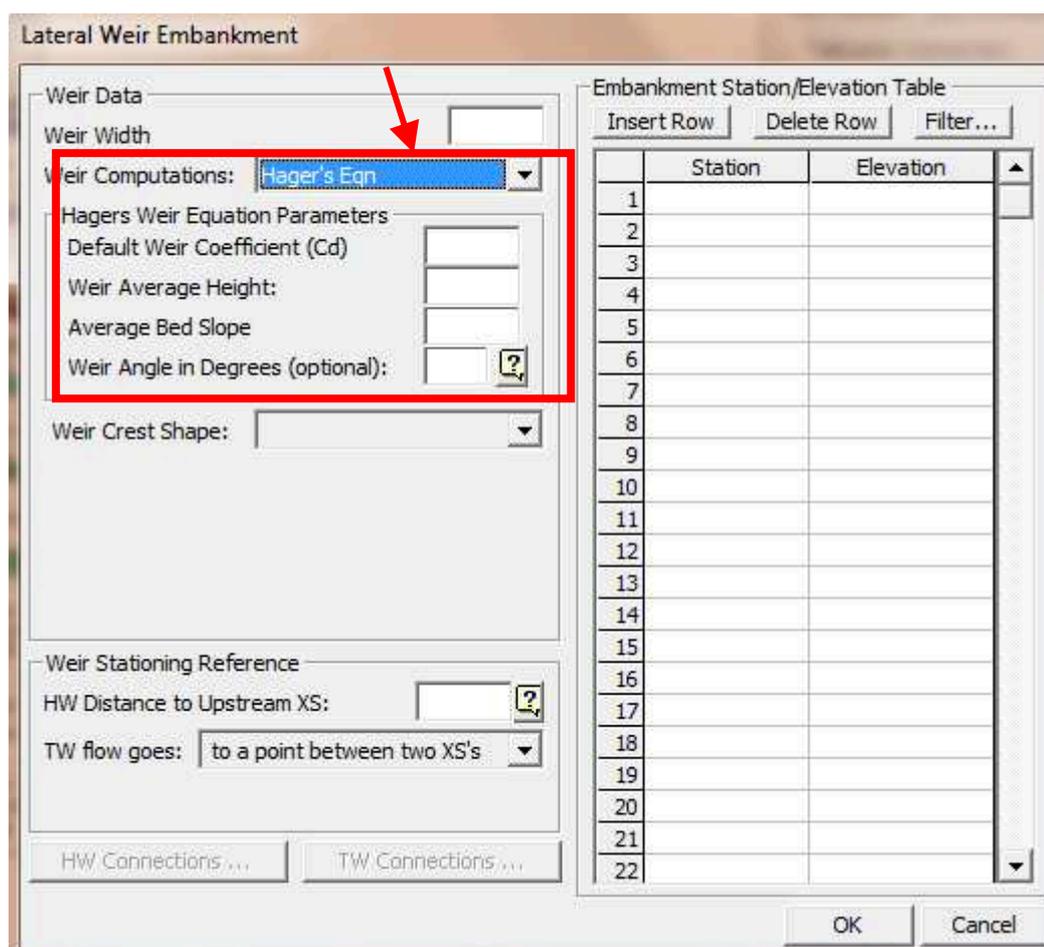


Figura 2.7 – Finestra “Lateral Weir Embankment” del software HEC-RAS

Per maggiori dettagli in merito all’applicazione dell’equazione di Hager, si rimanda a pag. 8-16 del “Hydraulic Reference Manual” e all’articolo di W. H. Hager (1987).

Per ulteriori informazioni riguardo l’utilizzo delle strutture laterali in HEC-RAS, si rimanda ai capitoli 8 e 14 del “Hydraulic Reference Manual”.

3 Coefficiente di efflusso nei ponti

Nella modellazione di un ponte, tra le varie informazioni richieste dal programma, c'è anche l'inserimento del coefficiente di efflusso C_{weir} ("Weir Coef").

Distance	Width	Weir Coef
1	9	1.705

Upstream			Downstream		
Station	high chord	low chord	Station	high chord	low chord
1	23.32	173.46	23.32	173.46	173.14
2	23.32	173.46	23.32	173.46	173.14
3	24.81	173.46	24.81	173.46	170.32
4	25.96	173.46	25.96	173.46	170.9
5	27.15	173.46	27.15	173.46	171.36
6	28.5	173.46	28.5	173.46	171.72
7	29.31	173.46	29.31	173.46	171.87
8	30.58	173.46	30.58	173.46	172.

Figura 3.1 – Finestra del modello d'inserimento delle caratteristiche geometriche del ponte

Il coefficiente di efflusso C_{weir} viene richiesto perché adoperato dal codice di calcolo nell'equazione (10) quando il livello raggiunto dall'acqua supera l'estradosso del ponte e quindi quest'ultimo si comporta come stramazzo a larga soglia.

Il valore che può essere adottato dal coefficiente di efflusso per uno stramazzo a larga soglia è il seguente:

$$C_{weir} = 0,385\sqrt{2g} = 1,705 \quad (15)$$

dove: $g = 9,806 \frac{m}{s^2}$ è l'accelerazione di gravità.

Il manuale di HEC-RAS suggerisce di mantenere comunque un valore del coefficiente di efflusso compreso tra 1,38 e 1,71 e specifica tale valore aumenta col livello raggiunto dall'acqua a monte dello stramazzo H (head).

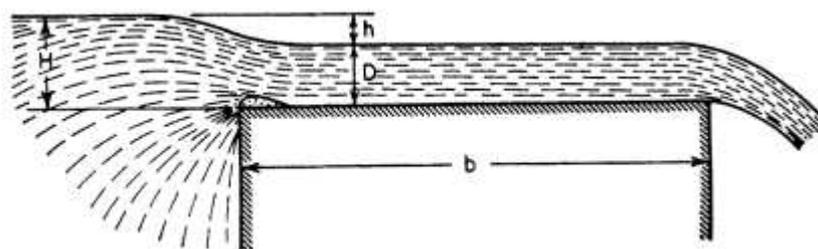


Figura 3.2 – Stramazzo a larga soglia [King et al., 1963]

È di seguito riportata la tabella del “Handbook of hydraulics” (King et al., 1963) dove vengono forniti diversi valori del coefficiente di efflusso al variare di H (*head*) e della larghezza dello stramazzo b (*breadth for crest of weir*).

Measured head, m	Breadth of crest of weir, m										
	0.15	0.20	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.20	1.50	3.00	4.50
0.10	1.61	1.55	1.50	1.46	1.44	1.44	1.43	1.40	1.38	1.41	1.49
0.20	1.70	1.60	1.52	1.46	1.44	1.44	1.48	1.49	1.49	1.49	1.49
0.30	1.83	1.73	1.65	1.52	1.47	1.46	1.46	1.48	1.48	1.48	1.45
0.40	1.83	1.80	1.77	1.61	1.53	1.48	1.46	1.46	1.46	1.48	1.46
0.50	1.83	1.82	1.81	1.70	1.60	1.52	1.48	1.47	1.46	1.46	1.45
0.60	1.83	1.83	1.82	1.67	1.57	1.52	1.50	1.48	1.46	1.46	1.45
0.80	1.83	1.83	1.83	1.81	1.70	1.60	1.55	1.50	1.48	1.46	1.45
0.90	1.83	1.83	1.83	1.83	1.77	1.69	1.61	1.51	1.47	1.46	1.45
1.0	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.76	1.64	1.52	1.48	1.46	1.45
1.2	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.70	1.54	1.49	1.46	1.45
1.4	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.59	1.51	1.46	1.45
1.5	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.70	1.54	1.46	1.45
1.7	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.83	1.59	1.46	1.45

Tabella 2 – Coefficienti di efflusso per stramazzo a larga soglia [King et al., 1963]

4 Coefficiente di contrazione ed espansione

Nella finestra dove si assegnano i dati geometrici e di scabrezza idraulica delle sezioni, vengono definiti anche i valori dei coefficienti di contrazione ed espansione. Questi ultimi sono utilizzati per valutare le perdite energetiche dovute rispettivamente alla contrazione e all'espansione della corrente tra la sezione che si sta considerando e quella più a valle, per effetto delle loro diverse geometrie; in sostanza i coefficienti sono moltiplicativi della differenza di energia cinetica tra le due sezioni:

$$h_{ce} = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (16)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità

V_1 e V_2 sono le velocità nella sezione che si sta considerando e in quella immediatamente a valle

α_1 e α_2 sono i coefficienti di ragguglio dell'altezza cinetica nella sezione che si sta considerando e in quella immediatamente a valle

C è il coefficiente di contrazione o espansione

h_{ce} è la perdita energetica dovuta all'espansione o alla contrazione

Queste valutazioni vengono effettuate solo nell'analisi in regime di moto permanente e vengono considerate nel calcolo del profilo di moto permanente che HEC-RAS effettuato con la procedura standard step; tuttavia i coefficienti possono essere inseriti anche per il moto vario. Nel caso di moto permanente, i coefficienti possono essere specificati direttamente dalla finestra relativa alle caratteristiche geometriche di ciascuna sezione (Figura 4.1) oppure dalla tabella mostrata in Figura 4.2. Nel caso di moto vario invece i valori dei coefficienti possono essere inseriti solamente attraverso la tabella di Figura 4.3.

Di solito, in regime di moto non stazionario, questi coefficienti non sono richiesti perché le contrazioni e le espansioni della corrente sono considerate nell'applicazione dell'equazione di equilibrio globale della quantità di moto (*momentum equilibrium*) attraverso la differenza delle forze di superficie. Tuttavia, nel caso di brusca contrazione o espansione, il codice di calcolo non riesce sempre a tenere in considerazione tutte le forze in gioco nell'equazione di equilibrio e quindi in tal caso valuta le perdite energetiche dovute alla contrazione/espansione servendosi degli appositi coefficienti (analogamente al caso di moto permanente). La perdita energetica così stimata viene convertita in una forza equivalente da utilizzare nell'equazione di equilibrio globale della quantità di moto.

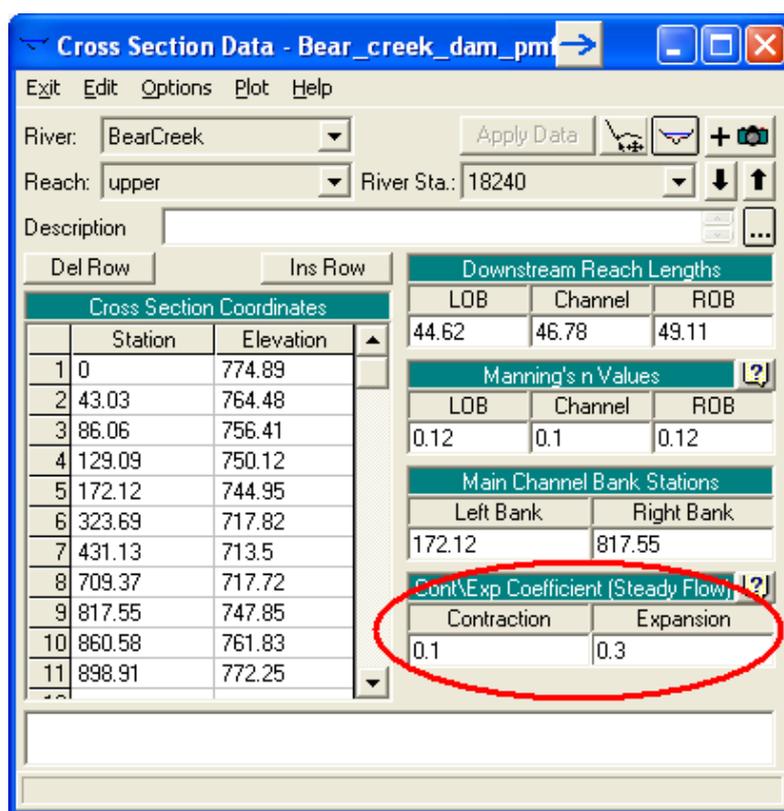


Figura 4.1 – Finestra per definire le caratteristiche geometriche di una sezione trasversale in HEC-RAS

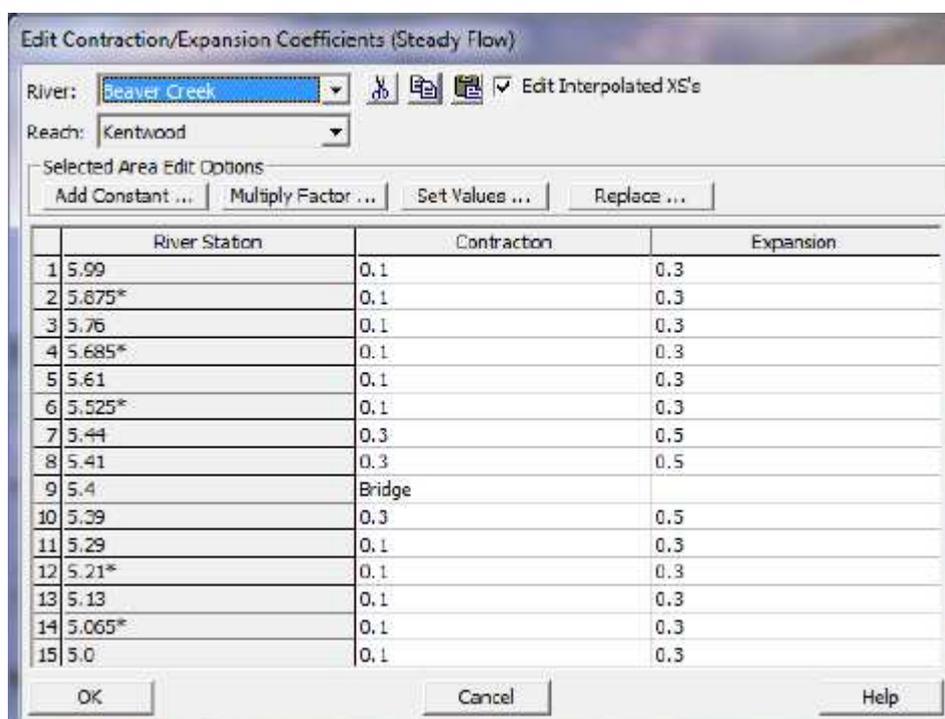


Figura 4.2 – Finestra per definire i coefficienti di espansione e contrazione nel caso di moto stazionario in HEC-RAS

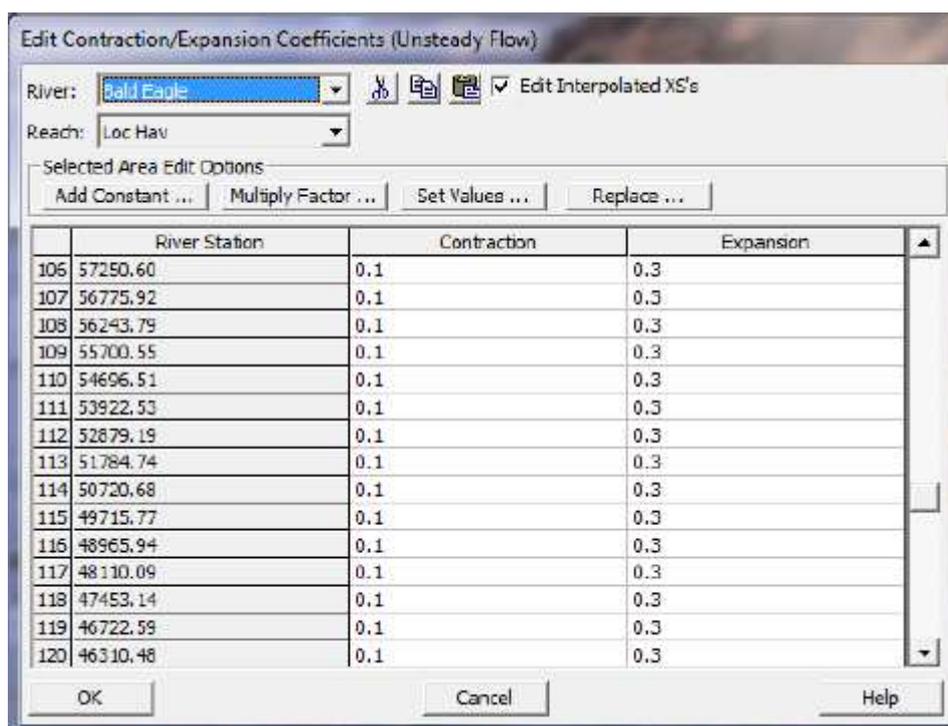


Figura 4.3 – Finestra per definire i coefficienti di espansione e contrazione nel caso di moto vario in HEC-RAS

HEC-RAS suggerisce l'utilizzo dei seguenti coefficienti di espansione e contrazione:

CORRENTI LENTE

	COEFF. DI CONTRAZIONE	COEFF. DI ESPANSIONE
Nessuna transizione che provochi perdite energetiche (non c'è cambio di geometria tra sezioni consecutive)	0,0	0,0
Transizione graduale (cambio di geometria graduale tra sezioni consecutive)	0,1	0,3
Transizione in corrispondenza di un ponte o di un'altra struttura idraulica ben raccordata (cambio di geometria un po' più brusco rispetto alla transizione graduale)	0,3	0,5
Transizione brusca (cambio di geometria brusco tra sezioni consecutive)	0,6	0,8

Tabella 3 – Uso dei coefficienti di espansione e contrazione per correnti lente

CORRENTI VELOCI

	COEFF. DI CONTRAZIONE	COEFF. DI ESPANSIONE
Nessuna transizione che provochi perdite energetiche (non c'è cambio di geometria tra sezioni consecutive)	0,0	0,0
Transizione graduale (cambio di geometria graduale tra sezioni consecutive)	0,01	0,03
Transizione in corrispondenza di un ponte o di un'altra struttura idraulica ben raccordata (cambio di geometria un po' più brusco rispetto alla transizione graduale)	0,03	0,05
Transizione brusca (cambio di geometria brusco tra sezioni consecutive)	0,05	0,2

Tabella 4 – Uso dei coefficienti di espansione e contrazione per correnti veloci

I coefficienti di contrazione ed espansione sono più bassi nel caso di correnti veloci perché, essendo esse caratterizzate da una velocità maggiore, c'è il rischio di sovrastimare le perdite energetiche.

In Figura 4.4 è riportato un esempio di applicazione dei coefficienti di contrazione ed espansione per un ponte nel caso di corrente lenta.

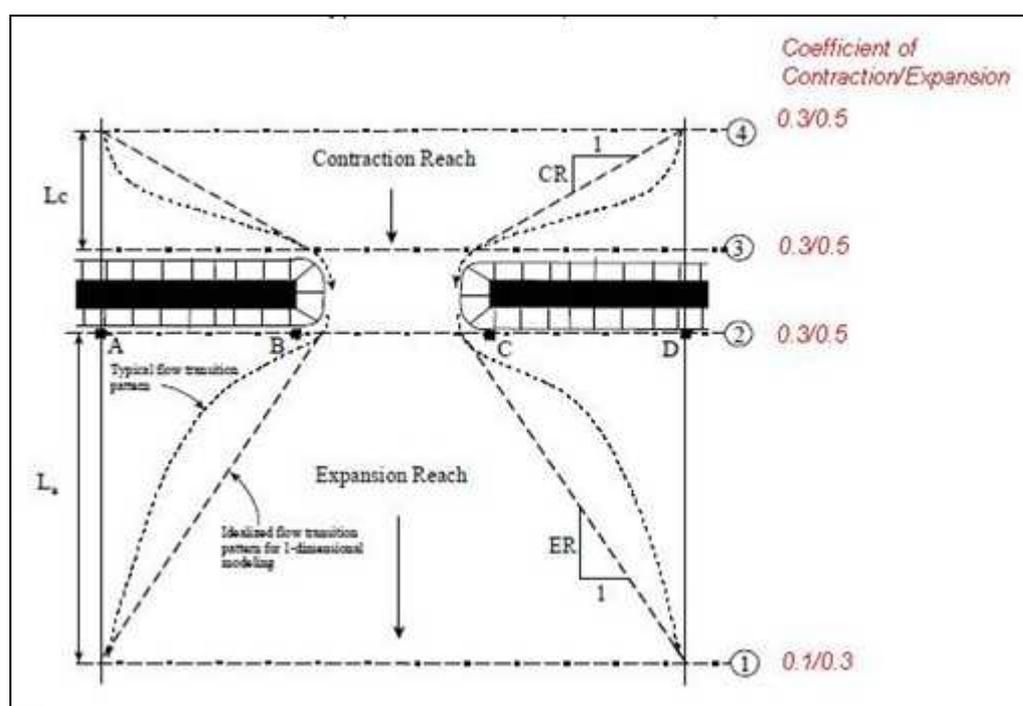


Figura 4.4 – Esempio applicativo dei coefficienti di espansione e contrazione in un ponte
[\[http://hecrasmodel.blogspot.it/2012/02/coefficients-of-contractionexpansion-at.html\]](http://hecrasmodel.blogspot.it/2012/02/coefficients-of-contractionexpansion-at.html)

5 Coefficiente per il calcolo della perdita energetica all'ingresso e all'uscita di un canale sotterraneo

Nella modellazione di un canale sotterraneo (*culvert*), tra le varie informazioni richieste dal programma, c'è anche l'inserimento del coefficiente utilizzati dal codice di calcolo per computare le perdite di carico all'ingresso e all'uscita del canale sotterraneo.

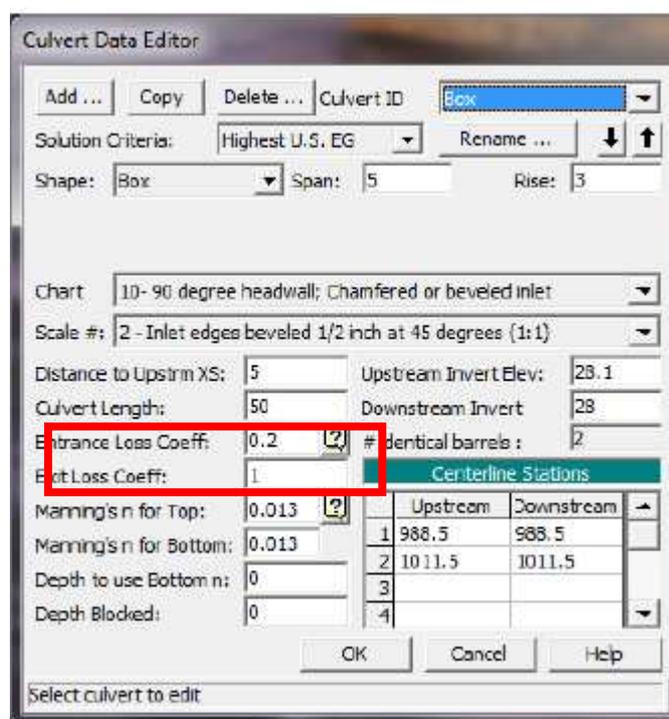


Figura 5.1 – Finestra del modello per l'inserimento delle caratteristiche di un canale sotterraneo

Entrance Loss Coeff e *Exit Loss Coefficient* sono i coefficienti che servono per calcolare le perdite energetiche rispettivamente all'ingresso e all'uscita di un canale sotterraneo. Anche in questo caso si tratta di coefficienti moltiplicativi di un'altezza cinetica.

$$h_{en} = K_{en} \frac{V_{en}^2}{2g} \quad (17)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità

V_{en} è la velocità del fluido all'ingresso del canale sotterraneo

K_{en} è l' "Entrance Loss Coefficient" ($K_{en} = 0,2 + 0,9$)

h_{en} è la perdita di carico dovuta all'ingresso del fluido nel canale sotterraneo

Per quanto riguarda la scelta dei valori del coefficiente K_{ex} , si rimanda alle tabelle 6-3, 6-4 e 6-5 a pag. 6-28 del *Hydraulic Reference Manual*.

È importante ricordare che le tabelle citate costituiscono solamente delle linee guida che possono indirizzare il progettista nella scelta del coefficiente e pertanto, dove possibile, questo coefficiente dovrebbe essere determinato attraverso un processo di calibrazione.

$$h_{ex} = K_{ex} \left(\frac{\alpha_{ex} V_{ex}^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) \quad (18)$$

dove: g è l'accelerazione di gravità

V_{ex} è la velocità del fluido all'uscita del canale sotterraneo

α_{ex} è il coefficiente di ragguglio dell'altezza cinetica all'uscita del canale sotterraneo

K_{ex} è l' "Exit Loss Coefficient" ($K_{ex} = 0,3 + 1$). In generale, assume valori più bassi quando l'uscita dal canale sotterraneo è meno brusca

h_{ex} è la perdita di carico dovuta all'uscita del fluido nel canale sotterraneo

V_2 è la velocità del fluido nella sezione immediatamente a valle del canale sotterraneo

α_2 è il coefficiente di ragguglio dell'altezza cinetica nella sezione immediatamente a valle del canale sotterraneo

6 Principali problemi d'instabilità del modello idraulico

Spesso si possono presentare problemi d'instabilità che conducono a delle oscillazioni delle soluzioni o all'interruzione della simulazione stessa. Queste situazioni si verificano soprattutto in condizioni di moto non stazionario. Sono di seguito riportati alcuni elementi che possono causare l'instabilità e le possibili soluzioni da adottare.

Per ulteriori approfondimenti in merito agli elementi che possono provocare l'instabilità del modello, si rimanda a pag. 8-69 del "User's Manual".

6.1 Sezioni

Il modello può incontrare problemi d'instabilità a causa del posizionamento di sezioni troppo ravvicinate o troppo distanziate tra loro. In generale, se la distanza tra le sezioni è tale da avere un numero di Courant molto maggiore di uno, il modello potrebbe diventare instabile. Si fa presente che la condizione di Courant è necessaria per la convergenza numerica delle soluzioni di alcune equazioni alle derivate parziali, tale per cui il passo temporale deve essere più piccolo di un certo intervallo di tempo. Per riuscire a stabilire in modo corretto la massima lontananza tra sezioni consecutive, si può ricorrere ad apposite equazioni, ad esempio all'equazione di Samuel:

$$\Delta x \leq \frac{0,15D}{S_0}$$

dove:

Δx è la distanza massima che deve esserci tra due sezioni consecutive

D è la profondità media delle sezioni

S_0 è la pendenza media dell'alveo

Va tenuto presente che è sempre meglio evitare di utilizzare le sezioni interpolate e basare il calcolo sulle sole sezioni reali. Tuttavia, se la distanza tra sezioni si presenta eccessiva, è bene ricorrere all'interpolazione. Nel caso in cui una sezione e quella successiva si dovessero presentare troppo diverse tra loro dal punto di vista geometrico e ben distanziate tra loro, ad esempio una è stretta e l'altra è molto più larga, è bene avvalersi dell'interpolazione al fine di evitare problemi d'instabilità.

Ad ogni sezione sono associate delle proprietà idrauliche che, se cambiano troppo rapidamente, possono generare problemi d'instabilità. Inoltre se durante la simulazione la superficie dell'acqua supera la più alta quota della sezione, le proprietà idrauliche vengono estrapolate e quindi la soluzione può essere instabile.

6.2 Passo temporale di calcolo

Anche l'intervallo temporale di calcolo non deve essere né troppo grande né troppo piccolo per evitare problemi d'instabilità. Se il passo temporale di calcolo è eccessivo, c'è il rischio che le proprietà idrauliche di una certa sezione cambino troppo rapidamente rispetto a tale passo; se il passo temporale di calcolo è ridotto, si rischia di non soddisfare la condizione di Courant:

$$C_r = V_w \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

dove:

V_w è la velocità dell'onda di piena, che di solito è maggiore della velocità media
 Δx è la distanza tra due sezioni
 Δt è il passo temporale di calcolo

Tuttavia, per fiumi sufficientemente larghi, la condizione di Courant può essere troppo restrittiva; infatti un passo temporale di calcolo maggiore è in grado comunque di garantire accuratezza e stabilità. Si può quindi ricorrere alla seguente formulazione semplificata per scegliere un passo temporale di calcolo Δt adeguato:

$$\Delta t \leq \frac{T_r}{20}$$

dove:

T_r è il tempo impiegato dall'idrogramma in ingresso, prima di subire eventuali laminazioni, per raggiungere il colmo.

6.3 Strutture

Gli sbarramenti, gli sfioratori e le strutture laterali possono generare instabilità. Ridurre il passo temporale di calcolo, adottare una pendenza minore e ricorrere ad appositi fattori di stabilità sono tre possibili soluzioni per superare il problema.

Nelle strutture laterali, quando uno stramazzo viene completamente sommerso dall'acqua, possono presentarsi problemi di oscillazioni e d'instabilità del modello. Per ridurre queste oscillazioni, si può agire sulle tolleranze entrando in "Computation Options and Tolerances" e quindi modificare il campo "Weir flow submergence decay exponent", attribuendogli un valore pari a 3.

6.4 Indice di Manning

L'indice di Manning troppo basso può provocare tiranti minori, velocità alte e correnti veloci che causano instabilità. Tuttavia queste situazioni si verificano specialmente nei torrenti ripidi caratterizzati già da correnti ad alta velocità.

6.5 Flusso in condizioni di magra e condizioni iniziali

Il flusso in condizioni di magra spesso conduce all'instabilità del modello poiché la profondità raggiunta dall'acqua all'interno dell'alveo è bassa e si può raggiungere un valore di tirante negativo. Una possibile soluzione, è quella di aumentare il valore della portata in ingresso.

Per quanto riguarda le condizioni iniziali, è necessario che esse siano compatibili con le condizioni al contorno previste nel modello.

6.6 Torrenti ripidi e regime di moto misto

Il modello trova difficoltà a raggiungere una condizione di stabilità in occasione di alte velocità e grossi cambiamenti nel tirante e nella velocità. I problemi maggiori si presentano soprattutto quando ci si avvicina alla condizione critica, ovvero quando il numero di Froude è prossimo a uno. Una soluzione suggerita è quella che prevede di aumentare l'indice di Manning, poiché esso viene spesso sottostimato nei torrenti ripidi. Un'altra strada è quella secondo la quale bisogna agire sugli idrogrammi e sulle condizioni iniziali inserite, incrementando il valore della portata. Per ridurre i problemi d'instabilità, si può anche ricorrere all'opzione di regime di moto misto (Mixed Flow Regime).

Per ulteriori approfondimenti si rimanda a pag. 16-2 del "User's Manual".

6.7 Variazioni di quota del fondo alveo

Brusche variazioni di quota nell'alveo possono causare il passaggio attraverso lo stato critico e quindi il modello risulta instabile. Per raggiungere la stabilità, si può aumentare la portata, incrementare il numero di sezioni e inserire l'opzione "Mixed Flow Regime", usare uno sbarramento per modellare il salto di quota oppure inserire una "Rating Curve" per la sezione più alta in corrispondenza del salto di quota.

6.8 Ponti e canali sotterranei

È facile avere notevoli cambiamenti di tirante e velocità che provocano instabilità in corrispondenza di ponti e canali sotterranei. Per risolvere il problema si può ridurre il passo temporale di calcolo oppure si può agire sui coefficienti idraulici.

6.9 HTab Parameters (Hydraulic Table Parameters)

Molti problemi d'instabilità in condizioni di moto vario possono essere risolti agendo sulla tabella dei parametri idraulici (*HTab Parameters*) che sono descritti da una famiglia di curve (*family of rating curves*).

HEC-RAS crea questa famiglia di curve (*family of rating curves*) utilizzando il “Geometric Preprocessor” con lo scopo di rendere più veloce la simulazione in regime di moto non stazionario. In questa maniera, invece di ricalcolare le variabili idrauliche per ogni sezione trasversale e a ciascun passo d'iterazione, HEC-RAS trova il valore delle variabili interpolando le curve create. Bisogna eseguire il “preprocessor” almeno una volta e ricalcolarlo solo nel caso di variazioni nella geometria delle sezioni. Le curve sono descritte da un insieme di punti discreti e il codice di calcolo effettua un'interpolazione di tipo lineare per trovare i valori tra due punti; è proprio in questa circostanza che possono insorgere errori e problemi d'instabilità nel modello.

In particolare, il “preprocessor” calcola per ogni sezione trasversale delle tabelle che descrivono dei grafici (“curves”) in cui il tirante idrico viene espresso in funzione delle diverse proprietà idrauliche (area bagnata, conveyance, ecc.). Ad ogni sezione vengono associati un certo numero di punti (minimo: 20 punti) corrispondenti a diversi valori del tirante idrico ed in corrispondenza dei quali vengono calcolate le proprietà idrauliche. Per stabilire la distanza tra questi punti, l'utente deve specificare un intervallo il cui valore è molto importante perché da esso dipendono i limiti di calcolo di ciascuna sezione, ovvero il tirante minimo e quello massimo per la stima dei parametri idraulici. L'intervallo dovrà essere sufficientemente ampio da consentire che siano compresi nei limiti tutti i tiranti che si presentano durante la simulazione in regime di moto vario. Tuttavia, nel caso tale intervallo dovesse essere eccessivamente grande, le “rating curves” potrebbero non essere sufficientemente accurate nel considerare la variazione dei parametri idraulici in funzione del tirante.

Nel caso in cui il tirante idraulico calcolato dovesse superare il massimo tirante idrico usato per il calcolo dei parametri idraulici nelle curve, HEC-RAS esegue un'estrapolazione lineare dei parametri idraulici; questa operazione può generare instabilità e al termine della simulazione potrebbe comparire il messaggio “*Extrapolated above cross section table*”.



Figura 6.1 – “Hydraulic Table Parameters” per una sezione trasversale nel software HEC-RAS

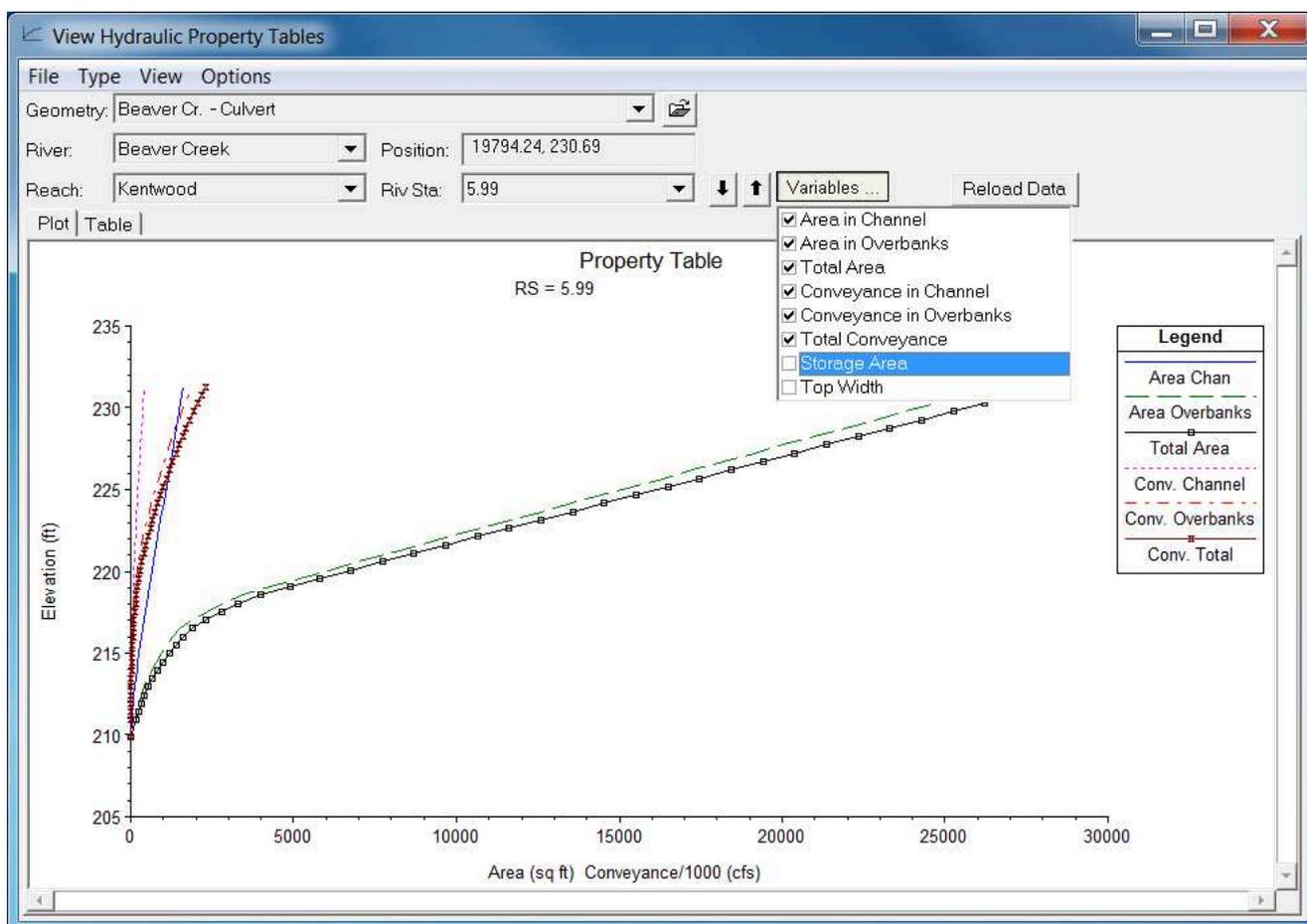


Figura 6.2 – “HTab curve” per una sezione trasversale nel software HEC-RAS

Un'altra opzione per riuscire a stabilizzare il modello, è quella che prevede di entrare nella sezione “*Computation option and tolerance*” ed aumentare il valore della voce “*maximum error in water surface solution*”.

Si ricorda infine che queste famiglie di curve vengono costruite anche per le strutture idrauliche (ponti, traverse, ecc..).

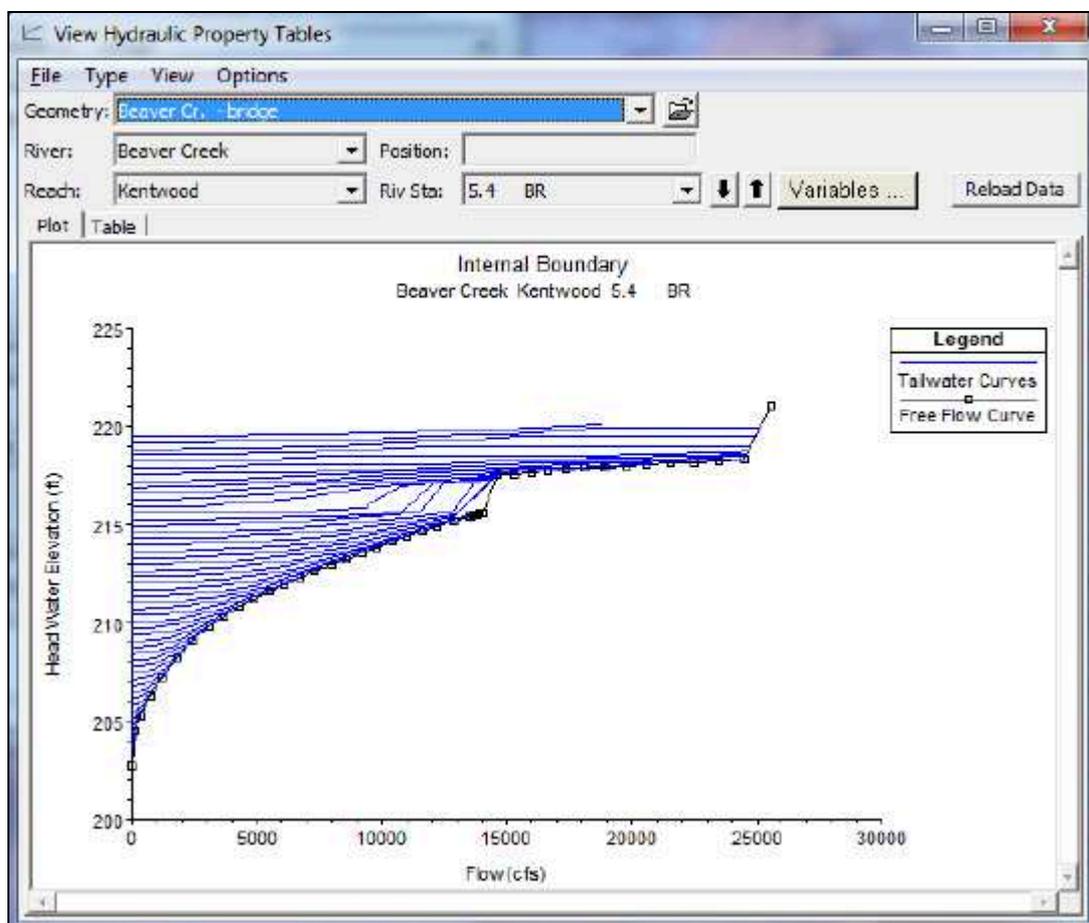


Figura 6.3 – Grafico “Hydraulic Table Parameters” realizzato dal “Preprocessor” di HEC-RAS

È buona abitudine che, al termine del processo di simulazione, l’utente controlli tutte le curve calcolate dal modello per assicurarsi che siano idraulicamente appropriate.

7 Messaggi di avviso e note tecniche

Dopo il processo di simulazione, vengono restituiti dal modello una serie di messaggi di avviso e di note tecniche per ciascuna sezione durante la simulazione dei profili che sono stati esaminati. In molti casi viene suggerito un infittimento delle sezioni interpolate, che favorisce la scomparsa di molti messaggi di avviso. In realtà il numero di sezioni interpolate tra due sezioni rilevate non può essere aumentato a piacere, sia perché le possibilità di numerazione di nuove sezioni non sono infinite sia perché potrebbero sorgere problemi di onerosità e precisione di calcolo. Pertanto, spesso non è possibile rimuovere tutti i messaggi di avviso presenti.

I messaggi di avviso e le note tecniche che possono comparire, sono raggruppate nelle seguenti tre categorie:

- *Errors*
- *Warnings*
- *Notes*

Gli “Errors” appaiono quando ci sono problemi che impediscono al programma di portare a termine la simulazione.

I messaggi di “Warnings” forniscono avvertimenti che possono richiedere oppure no l’intervento da parte dell’utente; infatti, se il risultato viene considerato ragionevole dal punto di vista idraulico, il messaggio può essere ignorato. In caso contrario, l’utente dovrà svolgere determinate azioni che consentano la scomparsa degli “Warnings” nelle simulazioni successive. Molti messaggi sono provocati dalla mancanza di sezioni interpolate oppure dall’inserimento di dati geometrici inadeguati.

Infine ci sono le note tecniche “Notes” che danno solamente indicazioni sulle modalità con cui il software ha eseguito il calcolo.

7.1 Messaggi di avviso

Vengono di seguito elencate ed analizzate alcune tra le principali tipologie di “Warnings” che possono comparire al termine di un processo di simulazione con HEC-RAS in moto vario o in moto stazionario:

“The energy loss was greater than 1.0 ft (0.3 m). between the current and previous cross section. This may indicate the need for additional cross sections”:

La perdita di carico continua tra due sezioni consecutive generalmente non presenta un andamento lineare e pertanto la presente notifica richiede l’inserimento di sezioni aggiuntive poiché, se le sezioni già presenti sono troppo distanziate tra loro, il software non riesce a calcolare

un'adeguata perdita di energia. È possibile scegliere l'equazione di default proposta dal software "Average Conveyance" (cfr. pag. 4-3 dell'Hydraulic Reference Manual) per il calcolo della cadente che è fondamentale per la successiva determinazione della perdita di carico continua.

L'operazione di interpolazione delle sezioni consente di rimuovere una grossa parte di questa tipologia di avvertimenti; tuttavia spesso non è possibile eliminarli tutti, soprattutto in corrispondenza e nelle vicinanze delle opere idrauliche (ponti, soglie e traverse).

"Divided flow computed for this cross-section":

Questo messaggio di avvertimento è legato alla configurazione geometrica della sezione. Esso indica che la portata sta attraversando più porzioni della medesima sezione, le quali risultano separate tra loro da una parte di fondo alveo che presenta quote maggiori. Nella figura sottostante è riportato un esempio di sezione trasversale per cui è segnalato il messaggio di notifica in questione:

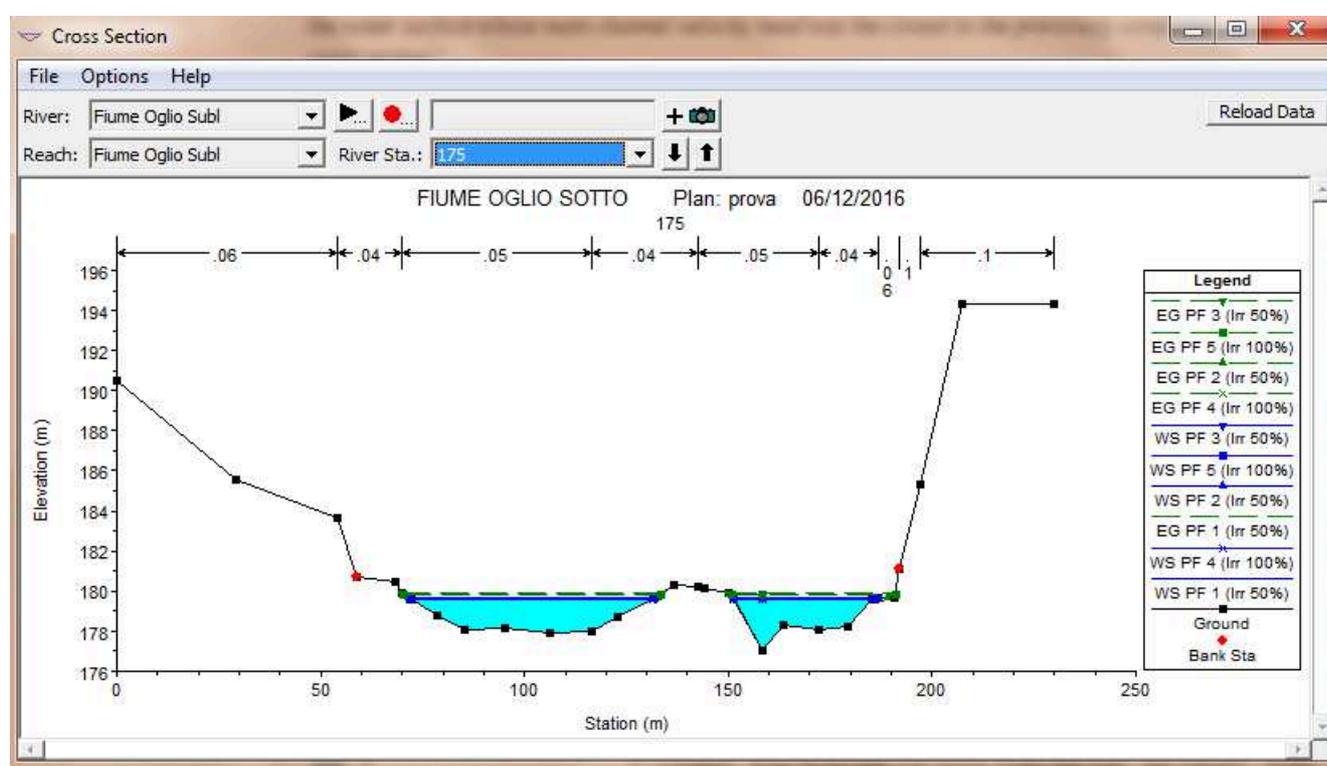


Figura 7.1 – Finestra di una sezione trasversale del software HEC-RAS che mostra la “divided flow”

"The conveyance ratio (upstream conveyance divided by downstream conveyance) is less than 0.7 or greater than 1.4. This may indicate the need for additional cross sections":

La conveyance K di una sezione trasversale è così definita (cfr. pag. 2-4 dell'Hydraulic Reference Manual):

$$K = \frac{1,486}{n} AR^{2/3}$$

dove:

K = conveyance

n = indice di Manning

A = area bagnata

R = raggio idraulico

Se i valori di n di Manning per due sezioni consecutive non presentano particolari differenze, come si evince dall'equazione sopra riportata, il rapporto di conveyance (ratio conveyance) dipende principalmente dall'area bagnata delle sezioni. Questa notifica di avvertimento compare quando il rapporto di conveyance supera il 30%, ossia quando le aree bagnate di due sezioni consecutive sono troppo diverse tra loro. Per avere un cambiamento geometrico delle sezioni più graduale, è bene inserire delle sezioni aggiuntive, in modo tale da permettere al programma un calcolo più accurato del livello raggiunto dal pelo libero dell'acqua e delle perdite energetiche di espansione e contrazione.

L'operazione di interpolazione delle sezioni permette di rimuovere una grossa parte di questa tipologia di avvertimenti. Quelli che spesso non scompaiono, si trovano principalmente in corrispondenza o nelle vicinanze delle opere idrauliche (ponti, soglie e traverse) e in presenza di bruschi cambi di direzione o forma tra una sezione e quella successiva, seppur posizionate tra loro a distanza ravvicinata.

“The energy equation could not be balanced within the specified number of iterations. The program used critical depth for the water surface and continued on with the calculations”:

Questa nota di avviso indica che, durante il calcolo del tirante di monte, il programma non riesce a computare perdite di energia sufficienti da garantire un tirante di corrente lenta nella sezione di monte. Quindi il software utilizza di default il tirante critico per proseguire la simulazione. Il problema può esser dovuto alla distanza eccessiva tra sezioni consecutive, al flusso di regime scelto che si è rivelato inadeguato o a problemi riscontrati nell'eseguire l'equazione di bilancio in prossimità di argini (levees) o aree inefficaci (ineffective flow area).

L'interpolazione delle sezioni consente di togliere buona parte di queste notifiche. Quelle che rimangono sono solitamente in corrispondenza o in prossimità delle opere (ponti, soglie e traverse).

“The velocity head has changed by more than 0.5 ft (0.15 m). This may indicate the need for additional cross sections”:

Questo messaggio di avvertimento segnala che la velocità media tra due sezioni consecutive è cambiata in modo significativo. Tale variazione può essere causata da un importante cambio di

pendenza o da un'eccessiva modifica della forma tra una sezione trasversale e quella seguente. Una possibile soluzione a questo tipo di problema è l'inserimento di sezioni aggiuntive, consentendo così al programma di calcolare in modo più accurato le perdite di energia e l'andamento del profilo tirante idrico.

L'interpolazione delle sezioni permette di rimuovere una grossa parte di questa tipologia di avvertimenti. I restanti si trovano generalmente in corrispondenza o nelle vicinanze delle opere idrauliche (ponti, soglie e traverse) e segnalano principalmente un importante cambio di pendenza.

“During the standard step iterations, when the assumed water surface was set equal to critical depth, the calculated water surface came back below critical depth. This indicates that there is not a valid subcritical answer. The program defaulted to critical depth”:

Questa nota di avvertimento compare quando il programma sta svolgendo un'analisi in corrente lenta ma, risolvendo in maniera iterativa l'equazione dell'energia, non riesce a determinare un tirante di corrente lenta nella sezione d'interesse. Pertanto il software propone un tirante critico e continua così a svolgere la simulazione. Questo avviso è spesso associato ad una distanza eccessiva tra sezioni consecutive o ad un travisamento delle aree efficaci in termini di portata (effective flow area) in una certa sezione trasversale.

Con l'interpolazione delle sezioni si possono eliminare una grossa parte di questa tipologia di avvertimenti. Quelli rimasti si trovano principalmente nelle vicinanze delle opere idrauliche (ponti, soglie e traverse).

“Pier drag coefficient of 2.0 assumed for Class B flow”:

Questo messaggio di avviso è legato all'impiego del coefficiente di Drag, e quindi alla forma del pilastro (per ulteriori approfondimenti si rimanda al capitolo 5 del Hydraulic Reference Manual).

“For the final momentum answer at the bridge, the upstream energy was computed lower than the downstream energy. This is not physically possible, the momentum answer has been disregarded”:

Questo tipo di avvertimento si presenta quando, in corrispondenza dei ponti e di un flusso di classe B (Class B low flow), il software non riesce a risolvere l'equazione del flusso della quantità di moto e quindi ricorre all'equazione dell'energia (Energy Equation) applicando il metodo “standard step” (cfr. pag. 5-16 dell'Hydraulic Reference Manual). Inoltre va tenuto presente che durante il calcolo dell'equazione del flusso della quantità di moto, se il livello raggiunto dall'acqua in corrispondenza del ponte viene a contatto col suo estradosso, tale equazione non è valida e, pertanto, il risultato non viene preso in considerazione (cfr. pag. 5-13 dell'Hydraulic Reference Manual).

“For the final momentum answer at the bridge, the upstream energy was computed lower than the energy inside of the bridge deck. This is not physically possible. Please review your bridge data and results for reasonableness”:

Questo tipo di avvertimento si presenta quando, in corrispondenza dei ponti, il software incontra difficoltà nella risoluzione dell’equazione del flusso della quantità di moto (per ulteriori approfondimenti si rimanda al capitolo 5 dell’Hydraulic Reference Manual).

“The energy equation could not be balanced within the specified number of iterations. The program selected the water surface that had the least amount of error between computed and assumed values”:

Questa nota di avvertimento indica che il software ha problemi nella risoluzione dell’equazione di bilancio dell’energia (per ulteriori approfondimenti si rimanda all’Hydraulic Reference Manual).

“The flow regime calculated by the momentum equation shows class B flow. For the best solution, this profile should be run as a mixed flow problem”:

Questo messaggio di avvertimento si presenta quando il software non riesce a risolvere l’equazione del flusso della quantità di moto (per ulteriori approfondimenti si rimanda al capitolo 5 del Hydraulic Reference Manual).

“The cross-section end points ha to be extended vertically for the computed water surface”:

Questa nota segnala che la sezione trasversale necessita di essere estesa verticalmente affinché possa convogliare la portata richiesta.

“When the manning’s n value for the channel was composited, the computed n value was larger [smaller] than the largest [smallest] user entered n value. The n value has been set to the largest [smallest] entered value. The user may wish to examine this cross section and enter a single n value for the entire channel”:

Questo avvertimento suggerisce di impostare un solo valore dell’indice di Manning per l’intera sezione trasversale, poiché il codice incontra delle difficoltà nella sua determinazione utilizzando i diversi valori dell’indice di Manning inseriti dall’utente.

7.2 Note tecniche

Sono di seguito riportate ed analizzate alcune tra le principali tipologie di “Notes” che possono comparire al termine di un processo di simulazione con HEC-RAS in moto vario o in moto stazionario:

“Multiple critical depths were found at this location. The critical depth with the lowest, valid, water surface was used”:

Questa nota tecnica compare quando il programma calcola il tirante critico servendosi del “secant method” (cfr. pag. 2-13 dell’Hydraulic Reference Manual) e si presenta più di un punto di minimo sulla curva dell’energia che descrive, per una certa portata costante, l’andamento dell’energia in funzione del tirante. Questa situazione è spesso associata a sezioni trasversali che riportano “rotture” nella curva dell’energia, dovute principalmente a golene larghe e piatte (senza grosse variazioni di quota) oppure alla presenza di argini (levees) e aree inefficaci (ineffective flow areas). L’utente può analizzare più attentamente il tirante critico che è stato determinato dal software per assicurarsi che si tratti di un valore legittimo. Ad esempio, è possibile svolgere un controllo a campione su alcune sezioni trasversali che riportano questa nota tecnica verificare così la validità del tirante idrico proposto dal programma.

“Manning's n values were composited to a single value in the main channel”:

Questa nota tecnica indica che HEC-RAS non è riuscito a garantire la variazione di scabrezza imposta dall’utente all’interno di una sezione trasversale e, pertanto, ha considerato un unico valore composto di n di manning (cfr. pag. 2-6 dell’ Hydraulic Reference Manual). Questa circostanza si verifica quando la “side slope” è troppo ripida. La “side slope” è il rapporto tra la distanza orizzontale di due punti (stations) che delimitano un tratto orizzontale della sezione trasversale e la differenza di quota (elevations) di questi due punti.

“Hydraulic jump has occurred between this cross section and the previous upstream section”:

Questa nota tecnica segnala il posizionamento del risalto idraulico nel passaggio da corrente veloce a corrente lenta. Si può ad esempio effettuare un controllo a campione su alcune sezioni trasversali che riportano questo messaggio.

“The momentum method has computed a class B profile” e “The energy method has computed a class B profile”:

Queste due ultime tipologie di note tecniche si trovano in corrispondenza di alcuni ponti dove si presenta un basso livello di flusso (low flow) e il pelo libero raggiunto dall’acqua è sottostante l’intradosso del ponte stesso. In questi casi, il software inizialmente si serve dell’equazione del flusso della quantità di moto (momentum equation) per capire quale sia la classe del flusso (cfr. pag. 5-9 dell’Hydraulic Reference Manual).

La classe B ad esempio è adatta per profili di corrente lenta o veloce. Questo tipo di classe si presenta quando il profilo passa per il tirante critico nel restringimento del ponte. Se, per qualche ragione, l’equazione del flusso della quantità di moto (momentum equation) non dovesse convergere ad una soluzione, il programma sceglie in automatico il metodo di bilancio dell’energia (energy-based method) (cfr. pag. 5-10 dell’Hydraulic Reference Manual) per il calcolo del profilo

di classe B attraverso il ponte. Nel flusso di classe B, è bene che l'utente svolga la simulazione scegliendo l'opzione "mixed flow regime" (cfr. pag. 5-16 dell'Hydraulic Reference Manual).

Pertanto, le due note tecniche in questione servono per segnalare che, trattandosi di un flusso di classe B, è giusto optare per la scelta "mixed flow regime".

Riferimenti bibliografici

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System, *User's Manual*, Version 5.0, February 2016.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System, *2D Modeling. User's Manual*, Version 5.0, February 2016.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System *16*, Version 5.0, February 2016.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System *Applications Guide*, Version 5.0, February 2016.

US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS River Analysis System *Release Notes*, Version 5.0.1, April 2016.

Hager W.H. (1987). "Lateral Outflow over Side Weirs". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 113(4).

Borghei S.M., Jalili M.R. and Ghodsian M. (1999). "Discharge Coefficient for Sharp-Crested Side Weir in Subcritical Flow". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, October, 1999.

Singh R., Manivannan D. and Satyanarayana T. (1994). "Discharge Coefficient of Rectangular Side Weirs". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 120(4).

King H.W. and Brater E.F. (1963). "Handbook of Hydraulics", Fifth Edition, McGraw Hill Book Company, New York.

Casulli (2008). "A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics". *Int. J. Numer. Meth. Fluids*. 2008.

<http://hecrasmodel.blogspot.it/2013/12/lateral-structure-coefficients.html>

<http://hecrasmodel.blogspot.it/2016/07/weir-equations-in-hec-ras.html>