



Impianto idroelettrico "Delle Rocche" sul fiume Tanaro  
(Barbaresco - CN)

## PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE AI SENSI DELLA L.R. N. 25/2003 – NORME IN  
MATERIA DI SBARRAMENTI DI RITENUTA E BACINI DI  
ACCUMULO DI COMPETENZA REGIONALE



CODICE DOCUMENTO

ELABORATO

2 9 0 2 - 0 4 - 0 0 3 0 1 . D O C 1.3.3

01	SET. 14	M.CERRINA	M.BUFFO	R.BERTERO	
00	GEN. 14	M.CERRINA	M.BUFFO	R.BERTERO	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE



## INDICE

1.	PREMESSA	1
2.	DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE	1
1.1	Schematizzazione geometrica del modello	1
1.2	Definizione dell'ipotesi di dambreak	3
1.3	Simulazioni idrauliche	4
1.4	Risultati ottenuti	4
3.	ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI	9

ALLEGATO 1 - Descrizione del modello numerico di simulazione MIKE 11



## 1. PREMESSA

Il presente documento descrive le metodologie adottate ed i risultati ottenuti relativamente allo studio degli effetti idrodinamici a valle dello sbarramento previsto sul fiume Tanaro al servizio dell'impianto idroelettrico "Delle Rocche" proposto da EDISON nel comune di Barbaresco (CN), conseguente all'ipotetico collasso (dam-break) della struttura costituente lo sbarramento stesso.

La verifica dell'ipotesi di improvviso collasso è finalizzata alla valutazione degli effetti che l'onda di piena di sommersione genera nel tratto di corso d'acqua a valle dello sbarramento.

Per la schematizzazione idraulica dello scenario di dam-break è stato utilizzato il modello numerico messo a punto nell'ambito della redazione delle verifiche idrodinamiche relative al funzionamento ordinario e in piena dello sbarramento in oggetto (vedi: Progetto definitivo - Relazione idraulica - Elaborato 1.3.1).

## 2. DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO DI SIMULAZIONE

Lo studio idraulico è stato eseguito mediante l'applicazione del codice di calcolo MIKE 11 del DHI<sup>Water Environment Health</sup> di cui si riporta una descrizione di dettaglio nell'allegato 1 al presente documento.

Il modello idrodinamico simula il deflusso in moto stazionario e non, secondo schematizzazione monodimensionale o quasi 2D, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali, descrivibile attraverso i diversi approcci dell'"onda cinematica", dell'"onda diffusiva" e dell'"onda dinamica" e con la messa in conto principalmente delle seguenti condizioni:

- portate laterali,
- flusso libero o rigurgitato,
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi,
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate,
- aree d'espansione,
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico).

Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e H alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico H, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La soluzione del sistema di equazioni di De Saint Venant permette di rappresentare, in dettaglio, tutte le trasformazioni che l'onda di piena subisce nella traslazione da monte verso valle per effetto della laminazione naturale, dell'interferenza con le opere idrauliche, delle esondazioni al di fuori dell'alveo attivo, della confluenza di tributari laterali e del contributo distribuito dei bacini di versante.

### 2.1 Schematizzazione geometrica del modello

Per la descrizione delle caratteristiche geometriche dell'alveo si sono utilizzati i rilievi topografici eseguiti da Hydrodata S.p.A. negli anni 2000 e 2013; in particolare nel marzo 2013 sono state ribattute le sezioni di rilievo lineari eseguite nell'anno 2000, in modo da rispettare la loro localizzazione e orientamento planimetrico. E'

stato inoltre eseguito un piano quotato di dettaglio, esteso anche alle aree adiacenti l'alveo inciso, per rappresentare correttamente l'area interessata dagli interventi e tutte le opere di difesa esistenti; sulla base di tale rilievo particolareggiato sono state ricavate 4 sezioni trasversali (S1\_2013, S7\_2013, S18\_2013 e S23\_2013) a cavallo della traversa, utilizzate nelle simulazioni idrauliche.

Il modello geometrico è compreso tra la sezione 52T a valle del ponte stradale e ferroviario di Alba (progressiva 144656 m) e la sezione 40T a valle del ponte di Neive (progressiva 154023 m).

Di seguito si riporta, in forma tabulare, il profilo longitudinale del modello geometrico, in cui sono elencate le sezioni trasversali utilizzate, la loro progressiva metrica, le quote di fondo alveo (thalweg) e la posizione dei manufatti idraulici e di attraversamento presenti.

Nel modello sono rappresentate le seguenti strutture:

- Traversa in progetto alla progressiva circa 151102 m.
- Ponte di Neive alla progressiva 152176 m.

Gli attraversamenti viari sono stati schematizzati come "struttura di tipo culvert" con cui si è descritta la geometria dell'attraversamento in termini di pile, impalcato, spalle e rilevati di accesso; il piano viabile è stato rappresentato come una potenziale linea di sfioro inserita come struttura aggiuntiva (di tipo weir) a quota coincidente con il piano viabile della strada capace di rappresentare eventuali fenomeni di sormonto del ponte stesso.

La soglia esistente localizzata in corrispondenza del ponte ferroviario è stata schematizzata nel modello come "struttura di tipo weir" che idraulicamente corrisponde alla formulazione di stramazzo in larga soglia; i coefficienti che esprimono le perdite di carico indotte dallo sbarramento sono stati assunti come nulli, data la geometria della traversa.

Per quanto attiene alla configurazione di progetto la traversa costituita dall'elemento gonfiabile localizzata circa alla progressiva 3543 m è stata schematizzata nel modello come "struttura di tipo weir" che idraulicamente corrisponde alla formulazione di stramazzo in larga soglia con ciglio sfiorante localizzato a quota di 105.80 m s.m., corrispondente ad un'altezza dello sbarramento pari a 4.30 m sul fondo alveo sistemato.

La costruzione del modello numerico è avvenuta inserendo le sezioni trasversali riportate nella Tabella 1, caratterizzate in termini di numerazione, progressiva metrica e quota di fondo alveo.

Sezione	Progressiva (m)	Quota fondo alveo (m s.m.)
52T	144656	155,22
51T	145519	153,02
8N	146119	152,20
50Tb	146750	149,12
50T	147720	149,08
49Tb	148380	148,54
49T	148945	145,16
48T	149669	145,92
47T	150484	142,95
S1_2013	150901	144,50
S7_2013	151011	144,50
Monte traversa	151101	144,50
Valle traversa	151103	144,00
S18_2013	151211	143,50
S23_2013	151303	143,03
44T	152116	138,70
43T - monte ponte di Neive	152165	138,70
43T - valle ponte di Neive	152187	138,70
42T	152217	138,45
41T	152950	134,78
40T	154023	134,20

Tabella 1 – Sezioni trasversali di rilievo utilizzate nella costruzione del modello di simulazione.

## 2.2 Definizione dell'ipotesi di dambreak

La simulazione dell'ipotetico collasso della struttura di sbarramento in progetto è stata eseguita numericamente assumendo cautelativamente le seguenti condizioni:

- 1) collasso istantaneo dello sbarramento per tutta la lunghezza e l'altezza di ritenuta;
- 2) portate in alveo a valle dello sbarramento pressoché nulle al momento del collasso; tale condizione (seppur teorica) rappresenta la situazione più gravosa nella quale verificare gli effetti del cedimento dello sbarramento.

La condizione (2) è stata assunta cautelativa in quanto, partendo da portate nulle, si hanno le massime variazioni relative di flusso; inoltre la condizione è di estrema criticità per persone che si addentrano nelle zone di alveo attivo, favorite dalla presenza di basse portate.

Al fine di consentire il corretto funzionamento del modello numerico sono state simulate le seguenti condizioni effettive:

- deflusso in alveo di una portata minima assunta come riferimento (pari a 1,0 m<sup>3</sup>/s) assimilabile ad una condizione di alveo "asciutto" a valle dello sbarramento, ma allo stesso tempo idonea a rappresentare, attraverso la minima portata defluente, l'effettivo e completo riempimento del bacino a monte dello sbarramento immediatamente prima del collasso;
- livello a monte dello sbarramento pari a 148,50 m s.m. prima del collasso della struttura gonfiabile;
- collasso del 100% della struttura di sbarramento.

L'abbattimento istantaneo simulato analizza la generazione dell'onda di dambreak causata dal passaggio dello sfioro del gommone da una quota pari a 148,50 m s.m. a quota 144,50 m s.m., corrispondente al fondo alveo sistemato di monte.

## **2.3 Simulazioni idrauliche**

La simulazione del fenomeno del collasso dello sbarramento è stata svolta in due fasi successive:

- a) simulazione del fenomeno di riempimento del bacino a monte dello sbarramento, fino al massimo volume invasabile, mediante immissione di una portata pari a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  tale da rappresentare la condizione di alveo asciutto pur consentendo il riempimento del serbatoio a monte;
- b) simulazione del collasso dello sbarramento (dam-break) inserendo quale condizione iniziale di simulazione, i risultati della simulazione di cui al punto precedente ed eliminando dal modello la struttura idraulica rappresentativa dello sbarramento.

Il modello MIKE11 consente infatti di imporre delle condizioni idrodinamiche iniziali e da queste determinare le nuove condizioni idrodinamiche di deflusso legate ad una variazione geometrica di sezione. In questo caso, come già detto in precedenza, si è rimossa la struttura dei gommoni passando da una quota di sfioro di 148,50 m s.m. ad una quota di 144,50 m s.m. che rappresenta la sezione sistemata su cui è ancorata la struttura di sbarramento.

La condizione al contorno introdotta per entrambe le simulazioni in entrata a monte (sezione a progressiva 144656 m) del modello è rappresentata da una portata costante pari a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , rappresentativa della condizione assimilabile all'alveo asciutto.

La condizione al contorno di valle, sempre per entrambe le simulazioni, è rappresentata dalla scala di deflusso imposta nella sezione terminale del modello (a progressiva 154023 m). La scala di deflusso è stata definita in funzione della pendenza media di fondo alveo del corso d'acqua nel tratto terminale.

Le resistenze distribuite assunte nelle simulazioni coincidono con quelle imposte nelle attività modellistiche redatte per il Progetto definitivo.

## **2.4 Risultati ottenuti**

Di seguito (Tabella 2) si allegano i risultati della simulazione relativa al fenomeno di istantaneo collasso dello sbarramento in progetto, limitati al tratto di corso d'acqua localizzato a valle dello stesso interessato dalla generazione dell'onda di sommersione. Si specifica che i valori idrodinamici riportati rappresentano l'involuppo dei massimi valori in corrispondenza del colmo dell'onda generata dal fenomeno di collasso istantaneo e non corrispondenti pertanto ad uno stesso istante temporale.



Sezione	Progressiva (m)	Fondo alveo (m s.m.)	Tirante (m)	Livello idrico (m s.m.)	Portata massima (m³/s)
52T	144656	155,22	0,20	155,42	1,00
51T	145519	153,02	0,25	153,27	1,00
8N	146119	152,20	0,06	152,27	1,00
50Tb	146750	149,12	0,28	149,40	1,01
50T	147720	149,08	0,16	149,24	1,02
49Tb	148380	148,54	0,19	148,73	1,18
49T	148945	145,16	3,34	148,50	7,06
48T	149669	145,92	2,58	148,50	84,16
47T	150484	142,95	5,55	148,50	617,35
S1_2013	150901	144,50	4,00	148,50	970,14
S7_2013	151011	144,50	4,00	148,50	1087,45
Monte traversa	151101	144,50	4,00	148,50	1791,38
Valle traversa	151103	144,00	2,76	146,76	1798,96
S18_2013	151211	143,50	2,79	146,29	1252,15
S23_2013	151303	143,03	2,63	145,66	1420,91
44T	152116	138,70	5,20	143,90	461,54
43T - monte ponte di Neive	152165	138,70	4,91	143,61	459,66
43T - valle ponte di Neive	152187	138,70	3,73	142,43	458,29
42T	152217	138,45	2,89	141,34	450,02
41T	152950	134,78	4,33	139,11	248,47
40T	154023	134,20	2,40	136,60	127,02

Tabella 2 – Risultati della simulazione relativa all'ipotesi di dambreak della traversa in progetto.

La Figura 1 rappresenta il profilo di corrente, in termini di involucro dei massimi livelli, nel tratto di corso d'acqua considerato a seguito dell'ipotesi di dambreak.

La Figura 2 rappresenta la propagazione verso valle degli idrogrammi di portata mentre la Figura 3 quelli di livello in condizioni di alveo asciutto. In entrambe le figure sono indicate in legenda le progressive delle sezioni del corso d'acqua in cui sono determinati gli idrogrammi di portata e livello.

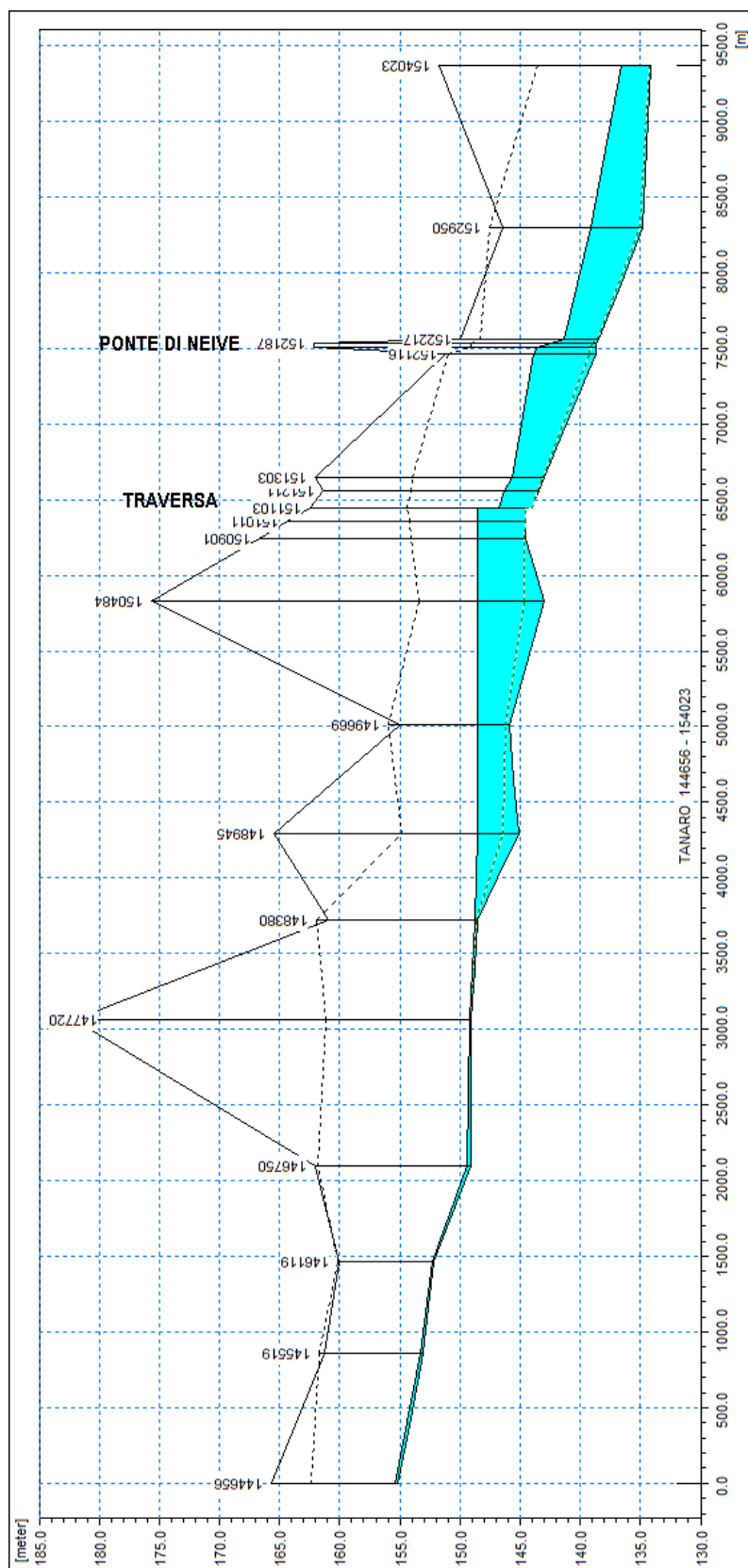


Figura 1 – Profilo di corrente (involuppo dei massimi livelli) del Tanaro a seguito di dambreak.

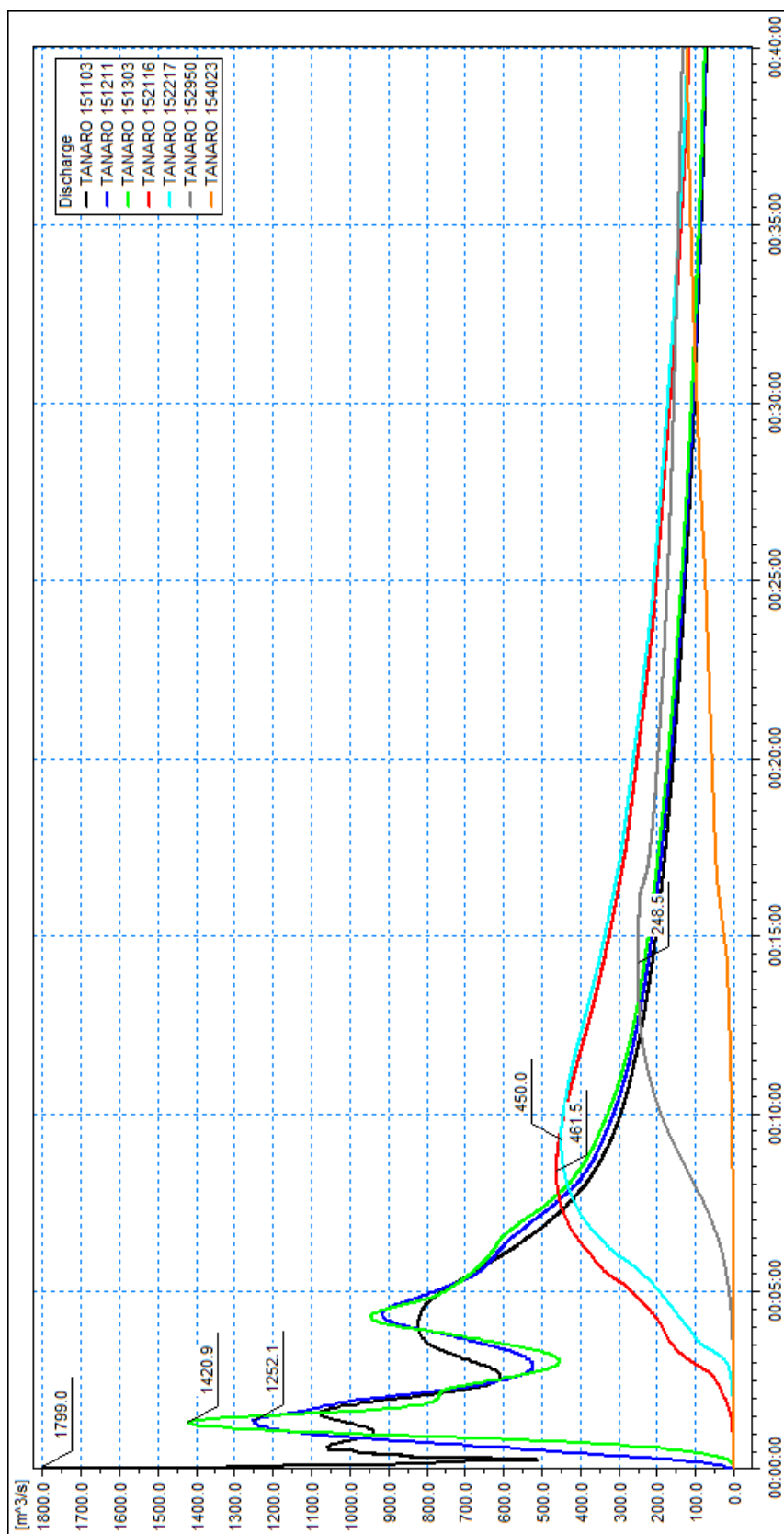


Figura 2 – Propagazione verso valle degli idrogrammi di portata a valle dello sbarramento.

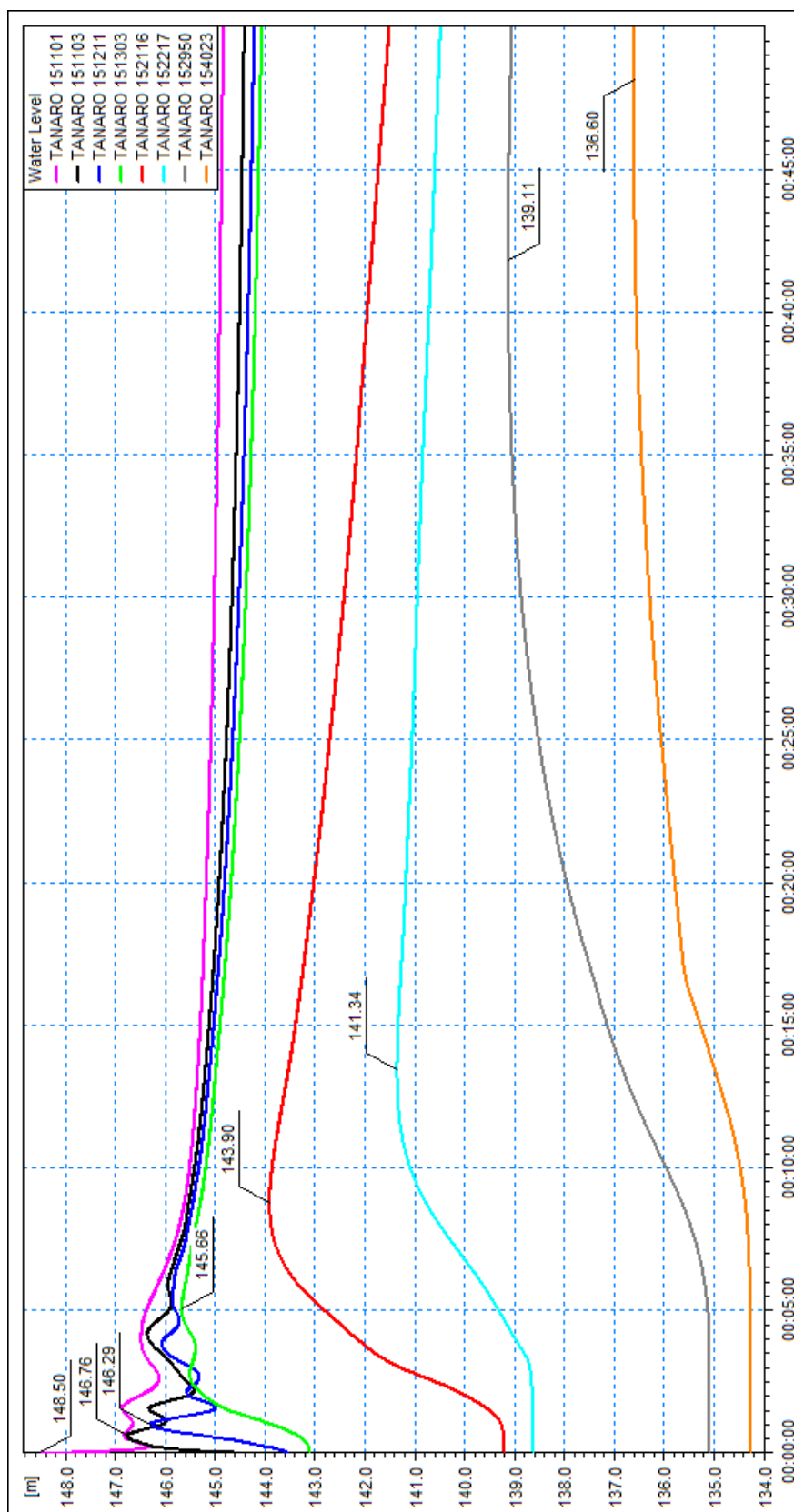


Figura 3 – Propagazione verso valle degli idrogrammi di livello a valle dello sbarramento.

### 3. ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

La verifica idraulica eseguita ha avuto come obiettivo quello di analizzare lo stato di criticità per il tratto di corso d'acqua a valle della traversa in progetto in occasione di un fenomeno di collasso dell'opera di sbarramento stesso, con particolare riferimento ai livelli idrici, alle larghezze del pelo libero ed alle portate massime riscontrabili nel corso del fenomeno nelle diverse sezioni d'alveo di riferimento.

La valutazione della criticità è avvenuta in termini di:

- a) valutazione dell'innalzamento del pelo libero rispetto alla condizione assimilabile ad "alveo asciutto";
- b) valutazione dello stato di rischio idraulico di esondazione nel tratto d'asta di valle;
- c) valutazione della velocità di propagazione dell'onda di sommersione e quantificazione dei tempi di arrivo.

Per quanto attiene al punto (a), l'innalzamento del pelo libero per effetto del dambreak è stato assunto pari al tirante generato in ciascuna sezione di valle, in quanto le verifiche idrauliche sono state eseguite nell'ipotesi di alveo asciutto (per generare tale fenomeno si è presa in considerazione una portata di riferimento minima di 1 m<sup>3</sup>/s alla quale corrispondono tiranti di pochi centimetri e pertanto trascurabili). Nella Tabella 2 sono riportati i valori dei tiranti massimi simulati, calcolati rispetto la quota minima di fondo dell'alveo (thalweg).

Dall'analisi dei massimi livelli idrici riscontrabili nelle sezioni indagate si evince che questi ultimi sono sempre contenuti abbondantemente all'interno dell'alveo inciso e non determinano fenomeni di esondazione.

Per ciò che riguarda i tempi di traslazione dell'onda si sono prese a riferimento la sezione immediatamente a valle dello sbarramento, la sezione 43T a monte del ponte di Neive e la sezione 40T localizzata al termine del tratto di Tanaro in esame.

L'idrogramma di livello che si genera alle ore 00:00 (istante convenzionale del collasso) nella sezione immediatamente a valle dello sbarramento (progressiva 151103 m) raggiunge la sezione di monte del ponte di Neive (progressiva 152165) dopo meno di 9 min (ore 00:08:49) con una velocità media del colmo pari a circa 2,0 m/s; dopo aver transitato oltre la struttura di attraversamento, esso raggiunge la sezione terminale del tratto modellato (progressiva 154023 m, circa 2.900 m a valle dello sbarramento, immediatamente a monte del confine col Comune di Castagnole Lanze) dopo circa 48 minuti (ore 00:48:09) con una velocità media del colmo pari a circa 1,0 m/s.

Per quanto su esposto si conferma che il rischio idraulico per collasso istantaneo e completo dello sbarramento risulta nullo in quanto:

- non si generano fenomeni di esondazione all'esterno dell'alveo inciso;
- i tempi di propagazione del fenomeno ed i conseguenti tempi di incremento di livello a valle, seppure di per sé abbastanza brevi fino al ponte di Neive, sono da ritenersi sufficientemente adeguati a consentire la fuga di persone eventualmente presenti nell'area dell'alveo inciso;
- viste le caratteristiche strutturali dello sbarramento, l'ipotesi di rottura totale dello sbarramento ipotizzata in base ai dettami della normativa vigente presenta una probabilità di accadimento estremamente bassa.



ALLEGATO 1 - Descrizione del modello numerico di  
simulazione MIKE 11





## 1. PREMESSA

Il programma MIKE11 è stato realizzato dal DHI (Danish Hydraulic Institute) a partire dal programma SYSTEM11 che dal 1972, anno della sua messa a punto, ad oggi, è stato usato in un grande numero di applicazioni in tutto il mondo con ottimi risultati e riconoscimenti.

MIKE11 è un programma generale per la simulazione del flusso idrico a pelo libero in estuari, fiumi, sistemi di irrigazione e simili corpi idrici. MIKE11 simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali.

E' possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenti).

L'adozione del programma di simulazione DHI\MIKE11, consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

## 2. DESCRIZIONE DELLE CONDIZIONI DI MOTO SIMULATE

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

1. Approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.
2. Approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.
3. Approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

## 3. EQUAZIONI GENERALI DI DE SAINT VENANT

MIKE11 mediante il terzo tipo di formulazione risolve le equazioni di conservazione del volume e della quantità di moto (equazioni di De Saint Venant) che sono derivate sulla base delle seguenti assunzioni:

- a) Il fluido (acqua) è incompressibile ed omogeneo, cioè senza significativa variazione di densità.
- b) La pendenza del fondo è piccola.
- c) Le lunghezze d'onda sono grandi se paragonate all'altezza d'acqua, in modo da poter considerare in ogni punto parallela al fondo la direzione della corrente: è cioè trascurabile la componente verticale dell'accelerazione e su ogni sezione trasversale alla corrente si può assumere una variazione idrostatica della pressione.

Integrando le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto si ottiene:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

ed introducendo la resistenza idraulica (attrito) e le portate laterali addotte:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

dove:

- A = area della sezione bagnata (m<sup>2</sup>);
- C = coefficiente di attrito di Chezy (m<sup>1/2</sup> s<sup>-1</sup>);
- g = accelerazione di gravità (m s<sup>-2</sup>);
- h = altezza del pelo libero rispetto ad un livello di riferimento orizzontale (m);
- Q = portata (m<sup>3</sup>/s);
- R = raggio idraulico (m);
- α = coefficiente di distribuzione della quantità di moto;
- q = portata laterale addotta (m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>).

#### 4. SIMULAZIONE DELLE CORRENTI VELOCI CON L'APPROCCIO DELL'ONDA DINAMICA

Per le correnti veloci viene applicata una equazione "ridotta" del moto, ottenuta trascurando il termine non lineare:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

La descrizione del moto è tanto più accurata quanto meno rapidamente variabile è la velocità della corrente.

Il vantaggio di questa schematizzazione è rappresentato dal fatto che è possibile ottenere una soluzione stabile con la stessa metodologia usata per le correnti lente. Nella transizione tra corrente lenta e veloce viene applicata una riduzione graduale del termine non lineare.

## 5. APPROSSIMAZIONE DELL'ONDA DIFFUSIVA

L'approssimazione dell'"onda diffusiva" consiste nel trascurare tutti i termini legati alla quantità di moto nelle equazioni generali di De Saint Venant:

$$gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0$$

Questa formulazione assicura ancora la descrizione dell'effetto di rigurgito attraverso il termine  $\partial h / \partial x$ . Per ragioni di stabilità questo termine nella soluzione viene smorzato; ciò significa che vengono risolti soltanto fenomeni di rigurgito relativamente stazionari (confrontati con lo step di tempo utilizzato).

## 6. DESCRIZIONE IN CORRISPONDENZA DI STRUTTURE

Dal punto di vista matematico la descrizione della corrente attraverso stramazzi o soglie e sezioni trasversali strette è abbastanza simile. In MIKE11 la descrizione di ogni struttura viene effettuata in un segmento di corso d'acqua.

### Tipi di strutture simulate.

#### Tipo 1. Stramazzo a larga soglia

Il programma automaticamente determina le caratteristiche di funzionamento standard dello stramazzo sulla base della geometria e dei coefficienti di perdita di carico specificati dall'utente. Viene assunta una distribuzione idrostatica delle pressioni sulla soglia e vengono utilizzati diversi algoritmi per la simulazione del deflusso libero e di quello rigurgitato.

#### Tipo 2. Relazione Q-h

Nel caso in cui le condizioni standard di funzionamento (tipo 1) dello stramazzo non risultino adeguate (ad esempio quando è evidente una significativa curvatura delle linee di corrente) è possibile specificare le relazioni Q-h (portate-livelli) valide per la data struttura. La relazione Q-h viene utilizzata per il deflusso libero in condizioni critiche, mentre per il deflusso rigurgitato (o sommerso) vengono utilizzati gli stessi algoritmi della struttura "tipo 1".

#### Tipo 3. Tombino

Un tombino può essere descritto mediante diversi algoritmi validi per condizioni di deflusso critico, rigurgitato o a "tubo pieno". il funzionamento a "tubo pieno" è a sua volta suddiviso in deflusso libero a valle, flusso rigurgitato e flusso sommerso. Deve essere inserita una relazione Q-h che contempli tutti i casi di deflusso critico allo sbocco del tombino. La portata critica è determinata da una formulazione di stramazzo a larga soglia quando l'imbocco è libero e da una formulazione di luce sotto battente quando l'imbocco è sommerso.

#### Tipo 4. Relazione Q-t

E' possibile inserire una qualsiasi relazione Q-t esterna per descrivere ad esempio il deflusso da una diga o un pompaggio. Questa relazione sostituisce localmente l'equazione di conservazione della quantità di moto.

Tipo 5. Relazione  $Q = A(Z_1) \cdot Z_2$

Il deflusso nell'ambito di una struttura può essere posto in relazione, in modo dinamico, a due qualsiasi variabili indipendenti del sistema consentendo di simulare regole operative particolari. Il deflusso da un invaso può per esempio essere correlato alla portata in ingresso e al livello nell'invaso (o al livello a valle di esso).

Tipo 6. Strutture mobili

E' possibile simulare la presenza di strutture mobili con condizioni di deflusso di tipo sfioro o luce sotto battente. Viene assegnata la geometria fissa della struttura (larghezza, quota del fondo per sistemi a sfioro tipo ventola, quota del livello massimo della paratoia per sistemi con luce sotto battente) ed una regola operativa che determina la quota della parte mobile della struttura in funzione di una delle seguenti condizioni idrodinamiche calcolate dal modello: un livello, una differenza di livelli, una portata, una differenza di portate, il tempo. Il modulo simula dinamicamente la variazione della geometria della struttura ed il flusso che ne consegue.

## 7. RESISTENZA D'ATTRITO

MIKE11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler.

Secondo la formula di Chezy, nell'equazione del moto il termine di resistenza risulta pari a:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{C^2 AR}$$

dove C è il coefficiente di attrito di Chezy.

Secondo la formula di Strickler, lo stesso termine diventa:

$$\tau_r = \frac{gQ|Q|}{M^2 AR^{4/3}}$$

dove M è il coefficiente di Strickler, pari a  $1/n$ , essendo n il coefficiente di Manning.

## 8. CONDIZIONI INIZIALI

Le condizioni iniziali possono essere specificate dall'utente oppure essere calcolate automaticamente. Nel secondo caso viene usata la formula di Chezy per determinare i livelli idrici e le portate da considerare all'inizio della simulazione su tutta la rete o schema idraulico. In alternativa a queste due opzioni è possibile anche assumere come condizioni iniziali i risultati di una precedente simulazione effettuata sullo stesso schema idraulico.

## 9. METODO DI SOLUZIONE

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti).

La griglia di calcolo viene generata dal modello in base alle richieste dell'utente:

- i punti Q sono posizionati sempre a metà tra due punti h vicini;

- la distanza tra due punti h può essere variabile;
- ad ogni sezione trasversale d'alveo viene assegnato un punto h;
- ad ogni struttura viene assegnato un punto Q.

## 10. CONDIZIONI AL CONTORNO

In MIKE11 le condizioni al contorno sono distinte in esterne ed interne. Le condizioni al contorno interne sono: legami tra punti nodali, strutture, portate interne, attrito indotto dal vento. Le condizioni al contorno esterne sono: valori costanti di h e Q, valori di h e Q variabili nel tempo, relazioni tra h e Q (ad es. scala di deflusso per una sezione d'alveo).

## 11. DEFINIZIONE DEI PASSI DI CALCOLO

La scelta ottimale dei passi di calcolo Dx (spazio) e Dt (tempo) da utilizzare nell'ambito di una simulazione è molto importante perchè questi parametri possono condizionare pesantemente la stabilità del calcolo numerico e quindi i risultati stessi della simulazione.

Esistono due differenti criteri per determinare correttamente i passi di calcolo Dx e Dt. Essi sono descritti nel seguito.

### 1) Criterio di Courant

$$Cr = \frac{\sqrt{g \cdot d} + V}{Dx} \cdot Dt$$

dove:

Cr = numero di Courant;  
d = altezza d'acqua media;  
V = velocità media della corrente;  
g = accelerazione di gravità;  
Dt, Dx = passi di calcolo.

Il numero di Courant esprime quanti Dx vengono percorsi da un'onda, causata da una piccola perturbazione, che si muove in un intervallo di tempo Dt unitario.

Per correnti lente ( $Fr < 1$ ), il valore massimo del numero di Courant deve essere inferiore a 20.

### 2) Criterio della velocità.

Il criterio della velocità stabilisce che i passi Dx e Dt di calcolo siano definiti in modo tale che la corrente si muova di uno spazio Dx in un tempo maggiore di Dt, e cioè:

$$V \cdot Dt < Dx$$

dove V è velocità media della corrente.

In definitiva entrambi i criteri esprimono il concetto che, per un dato passo di tempo Dt, Dx deve essere maggiore di un valore definito; contemporaneamente sia Dt che Dx devono essere inferiori a valori prestabiliti, in modo da descrivere correttamente il fenomeno in esame.

Il modello DHI/MIKE11 genera automaticamente una griglia di calcolo sulla quale i nodi che rappresentano le altezze d'acqua sono localizzati in corrispondenza delle sezioni trasversali di rilievo. Nel caso in cui la

distanza tra due sezioni sia maggiore di  $Dx$ , vengono inseriti ulteriori nodi intermedi di calcolo, distanti fra loro  $Dx$  o meno.

In osservanza ai sopracitati criteri è possibile definire unicamente intervalli di valori per  $Dx$  e  $Dt$  e non valori univoci per ogni simulazione.