

# IGEA SpA

## VALUTAZIONE DELLE CONDIZIONI DI RISCHIO CONNESSE ALLA PRESENZA DELLA TAILINGS DAM DELLA SGM NEL TERRITORIO DI FURTEI

			Prof. Ing. Battista Grosso Prof. Ing. Andrea Saba	<b>RELAZIONE IDRAULICA</b>
2				
1				
0	Emissione	AGOSTO 2017		
Rev n°	Descrizione	Data		



## Indice generale

<b>1. - Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2. - Caratteristiche del Bacino Sterili e del deposito.....</b>	<b>4</b>
2.1. - Il Bacino Sterili.....	4
2.2. - Il deposito.....	5
<b>3. - Caratteristiche generali dell'alveo.....</b>	<b>7</b>
<b>4. - Inquadramento teorico del problema. Il modello Dambrk.....</b>	<b>8</b>
<b>5. - La modellazione numerica.....</b>	<b>11</b>
5.1. - Parametri adottati nella modellazione numerica.....	11
5.2. - Parametri di input e forma dei risultati.....	13
5.3. - Condizioni al contorno.....	14
5.3.1. - Condizioni all'istante 0.....	14
5.3.2. - Condizioni al contorno nelle sezioni di estremità al variare del tempo.....	14
5.4. - Rappresentazione della morfologia e delle caratteristiche idrauliche dell'alveo.....	16
<b>6. - Risultati della simulazione.....</b>	<b>20</b>
6.1. - Onda di piena in uscita dal bacino.....	20
6.2. - Caratteristiche del moto lungo l'alveo.....	23
<b>7. - Considerazioni conclusive.....</b>	<b>28</b>

## 1. - Introduzione

Obiettivo del presente studio è ricostruire le modalità con le quali il materiale contenuto all'interno del bacino di contenimento degli sterili prodotti dall'impianto di trattamento della Miniera di Furtei viene rilasciato a valle nell'ipotesi di collasso della struttura di contenimento.

L'analisi svolta prescinde dalla probabilità che la struttura effettivamente collassi, né è legata alla verifica strutturale del bacino di contenimento.

L'analisi svolta è affetta da un grado di incertezza legato alla effettiva modalità con la quale la struttura dovesse collassare, in quanto il suo cedimento strutturale è puramente ipotetico, e non legato ad una specifica dinamica di accadimento.

Nell'analisi svolta, sono stati quindi assunti valori cautelativi delle grandezze in gioco, così da rendere le più estreme possibili

## 2. - Caratteristiche del Bacino Sterili e del deposito

### 2.1. - Il Bacino Sterili

Il bacino sterili è situato nel Comune di Furtei, ed è costituito essenzialmente da una valle naturale chiusa nella sezione di valle da un muro principale, il cui centro ha coordinate  $39^{\circ}31'53.35''$  N -  $8^{\circ}59'05.16''$  E, ed è illustrato in Fig. 1.



Figura 1 - Immagine Satellitare del Bacino Sterili

Il muro principale è realizzato da un di riempimento di pietrame alto circa 45 m con una quota del bordo di 245 m s.l.m. e una lunghezza di circa 150 m (Fig. 2).

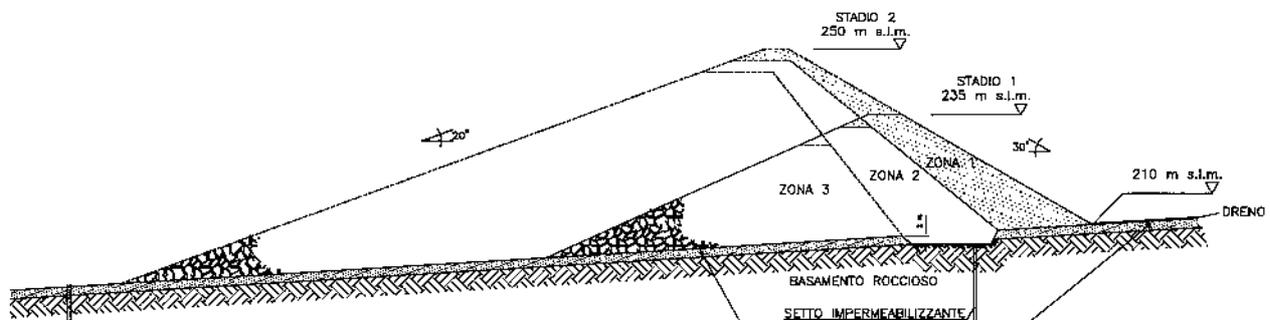


Figura 2 - Sezione trasversale del muro di valle, come da progetto

Il muro è stato costruito fra i muri rocciosi ripidi in un restringimento della valle del “Riu S’Alluminu”, circa 1 km a monte dell’impianto di trattamento da cui provengono gli sterili accumulati all’interno del bacino stesso. L’accesso alla diga dall’impianto avviene tramite la strada non finita, del bacino degli sterili e del Comune.

Il rivestimento a monte è costruito con argilla locale messa in opera, a strati e compattata per mezzo di un rullo costipatore a piè di pecora. Questo rivestimento è alto circa 4 m e ha un angolo di pendenza compreso fra 30° e 35°.

Il bacino degli sterili funziona in un circuito chiuso e di conseguenza il controllo delle piene è fornito dal mantenimento di un adeguato franco di protezione della diga e dalla deviazione di una parte delle acque di deflusso superficiale intorno al bacino imbrifero attraverso canali di guardia costruiti sulla sponda destra e sinistra del deposito. Il franco di protezione della diga corrente è di circa 4 m.

700 m a monte del muro principale è stato realizzato un muro a monte, costituito da un argine basso. In conseguenza alla costruzione del muro a monte si sono creati dei bacini di drenaggio supplementari attraverso i quali si ha il controllo del bacino imbrifero del muro. Il bacino creatosi tra il muro a monte ed il vecchio sbarramento prende il nome di F34 DT, mentre il bacino tra il muro a monte e la strada Serrenti – Guasila, F34 FM. È stato costruito inoltre un bacino di raccolta delle acque del canale di drenaggio supplementare che prende il nome di “Bacino 1 raccolta acque”.

Attualmente il bacino contiene sterili fino alla quota di 241 m s.l.m. circa.

## 2.2. - Il deposito

L'invase svolge la funzione di bacino di decantazione, cioè un deposito per la messa a dimora di sterili derivanti dal processo mineralurgico di arricchimento nel quale il materiale viene scaricato sotto forma di torbida. La proporzione d'acqua contenuta sosta nel deposito il tempo necessario per la decantazione del solido e viene poi evacuata e ricondotta in testa all'impianto di trattamento.

L'insieme impianto-deposito è un sistema chiuso senza scarichi nè perdite all'esterno. Per questo motivo l'acqua raccolta dal sistema di decantazione sarà riciclata, l'argine ed il fondo del deposito saranno resi impermeabili, sul fondo del bacino ed al suo interno sarà realizzato un sistema di filtrazione per l'evacuazione dell'acqua residua dopo decantazione.

Le tubazioni di raccolta dell'acqua decantata e dell'acqua di filtrazione saranno indipendenti, per il controllo dell'efficienza dei due sistemi, e regolate da valvole di chiusura, per il controllo del tempo di permanenza.

L'impianto è stato operativo nel periodo 1997-2003, nel corso del quale sono stati accumulati 1'521'615 tonnellate di materiale.

All'origine, il fango inviato al bacino aveva una percentuale di solido intorno al 40%, mentre attualmente la percentuale di materiale solido dovrebbe aggirarsi intorno al 60%.

La granulometria, riportata in Fig. 3, indica che il fango conferito è tutto sotto i 150 µm e ha il 50% circa sotto i 40 µm.

## Analisi granulometrica Serbatoio L7 %Peso, Au, Granulometria

25 settembre 2007

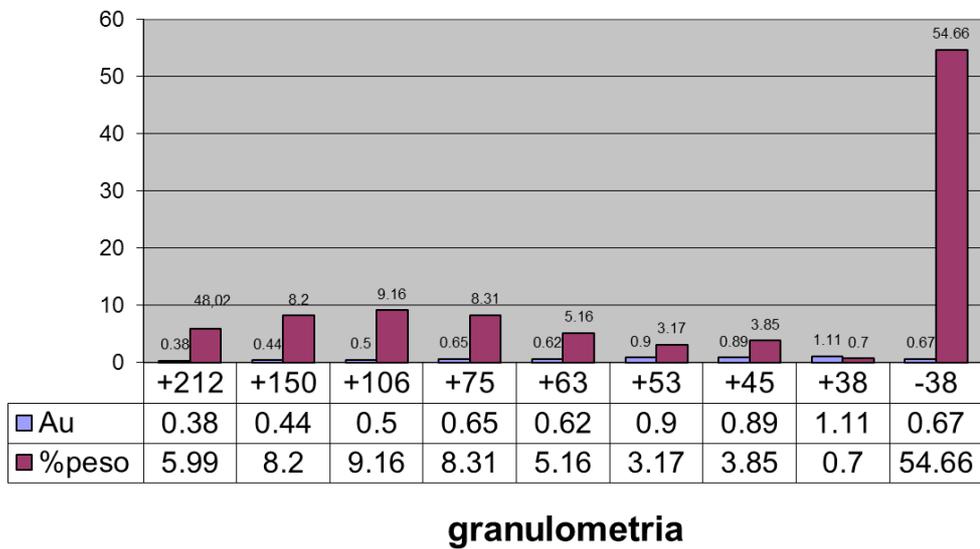


Figura 3 - Granulometria del materiale contenuto all'interno del bacino

### 3. - Caratteristiche generali dell'alveo

L'alveo analizzato è il Rio S'Alluminu, nel tratto compreso tra il Bacino Sterili e la Traversa sul Fluminimannu a Casa Fiume, per una lunghezza complessiva di circa 5 km.

L'alveo si presenta ben incassato per tutta la sua lunghezza, allargandosi solo in corrispondenza del bacino sotteso dalla traversa sul Fluminimannu a Casa Fiume.

A metà tracciato, il Rio riceve l'affluente proveniente dallo scarico della diga di Sa Forada de S'acqua (Fig. 4).

Tale immissione caratterizza l'alveo per il fatto che da quel punto in poi il Rio risulta sistemato in modo molto regolare per consentire l'accompagnamento delle portate scaricate dalla diga fino alla Traversa di Casa Fiume.

La Traversa di Casa Fiume è gestita dall'Ente Acque Sardegna (ex Ente Autonomo del Flumendosa) e riceve le acque provenienti dagli invasi del sistema del Flumendosa (Flumineddu - Flumendosa - Mulargia) e la Diga di Sa Forada costituisce un punto di passaggio utile allo sfruttamento anche ai fini idroelettrici del trasferimento idrico. Dalla Traversa di Casa Fiume partono due importanti canali a pelo libero che distribuiscono le acque del sistema del Flumendosa all'intero Campidano fino a Cagliari.



*Figura 4 - Alveo del Rio S'Alluminu*

Lungo il tracciato sono state tracciate 41 sezioni (Vedi All. 3) utilizzate per descrivere l'idraulica del corso d'acqua.

Lungo il tracciato sono presenti 3 attraversamenti le cui caratteristiche geometriche non sono state considerate nello studio in quanto le portate e i livelli idrici in gioco comporteranno la rapida distruzione degli stessi e la loro ininfluenza ai fini dell'analisi del moto conseguente l'ipotetico collasso del bacino..

## 4. - Inquadramento teorico del problema. Il modello Dambirk

La propagazione di un'onda di piena in una rete idrografica naturale è un tipico processo di moto vario, ossia variabile rispetto al tempo (non permanente) e rispetto allo spazio (non uniforme). Per poter descrivere le caratteristiche di questo tipo di corrente si possono adottare le equazioni di De Saint Venant, che constano di una equazione di continuità, e di una equazione di movimento:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

(2)

dove:

- x ascissa longitudinale;
- t coordinata temporale;
- A area della sezione bagnata;
- Q portata;
- h profondità della corrente;
- a coefficiente di ragguglio dell'altezza cinetica, di poco superiore ad 1;
- g accelerazione di gravità;
- J cadente della linea dei carichi totali, dipendente dalla scabrezza dell'alveo (secondo Manning  $J = (n^2 V^2)/R^{4/3}$ , con n coefficiente di scabrezza, V velocità ed R raggio idraulico);
- i pendenza longitudinale del fondo dell'alveo.

In presenza di fluidi diversi dall'acqua il termine J contiene un termine dissipativo aggiuntivo dato da:

$$S: \frac{\kappa}{\gamma} \left[ \frac{(b \cdot 2)Q}{A D^{b-1}} + \frac{(b \cdot 2)(\tau_0 \kappa)^b}{2 D^b} \right]^{1/b}$$

in cui  $\kappa$  è la viscosità dinamica,  $\tau_0$  è lo sforzo tangenziale mobilitante e  $b=1/m$  indica le caratteristiche della curva reologica riportata in Fig. 5.

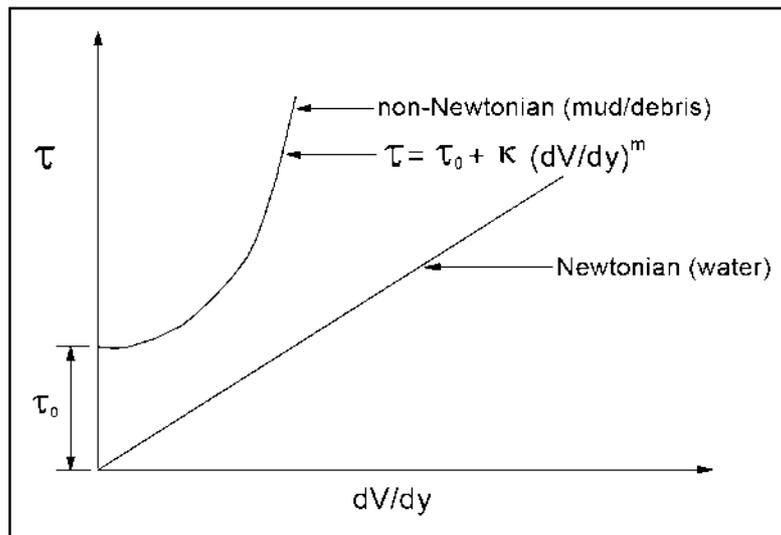


Figura 5 - Curva reologica per fluidi non Newtoniani

Le equazioni di De Saint Venant rendono conto del moto vario di una corrente lineare, e possono quindi essere applicate con buona approssimazione ogniqualvolta la corrente abbia un carattere marcatamente monodimensionale, con variazioni non brusche di  $Q$  e  $h$ .

Tali equazioni costituiscono un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine di tipo iperbolico, che non consente soluzioni analitiche chiuse, e rende quindi necessario il ricorso a metodi di integrazione per differenze finite.

L'integrazione per differenze finite delle equazioni di De Saint Venant richiede l'adozione di tecniche di risoluzione molto sofisticate, come di norma accade quando si trattano sistemi di equazioni differenziali. Nel caso specifico, un'ulteriore complicazione che si presenta nell'implementazione del modello di calcolo risiede nel fatto che, come noto, l'equazione del moto (2) non viene soddisfatta in corrispondenza del risalto idraulico, dove deve essere sostituita dalla condizione di uguaglianza delle spinte.

Attualmente, la grande maggioranza dei modelli numerici proposti per lo studio del moto vario delle correnti a pelo libero sono basati sulle equazioni di De Saint Venant. Alcuni di questi sono specificamente dedicati allo studio dell'onda conseguente alla rottura di una diga, e accoppiano all'integrazione numerica delle equazioni di De Saint Venant per lo studio del transitorio innescato dal collasso della diga sia a monte che a valle della stessa, un algoritmo atto a descrivere le modalità di formazione e lo sviluppo della breccia nel corpo della struttura nonché le condizioni idrauliche che regolano l'entità e la distribuzione temporale della portata uscente. Si tratta quindi, in sostanza, di modelli integrati che mettono in conto tutte le variabili che in qualche modo possono influenzare la forma e l'evoluzione dell'onda di piena.

Il modello che si è adottato in questo studio è il "NWS DAMBRK MODEL", uno dei più diffusi e sperimentati di cui oggi si dispone, messo a punto dall'Hydrologic Research Laboratory del National Weather Service degli Stati Uniti.

Il modello risolve per differenze finite il sistema di equazioni di De Saint Venant secondo lo schema detto "dei quattro punti pesanti" ("weighted four-point"), che ricava dalle equazioni di De Saint Venant un sistema di  $2N-2$  equazioni non lineari in  $2N$  incognite, rappresentate dalla profondità della corrente e dalla portata in ciascuna delle  $N$  sezioni assunte ad individuare la geometria

dell'alveo naturale. Alle  $2N-2$  equazioni disponibili vengono poi aggiunte due condizioni al contorno, che possono essere fissate in vario modo, a seconda delle caratteristiche del sistema. E'così possibile determinare univocamente, istante per istante, le  $2N$  incognite mediante un procedimento iterativo basato sul metodo di Raphson-Newton: partendo dall'istante iniziale, in cui lo stato del moto è noto in tutte le  $N$  sezioni sulla base delle condizioni iniziali fissate dall'utente, il sistema viene risolto per ogni successivo passo temporale partendo dai valori noti dei livelli e delle portate calcolate nel passo temporale precedente.

Il procedimento iterativo di Raphson-Newton, implementato nel modello DAMBRK, presenta talvolta quei tipici problemi di convergenza e di instabilità legati alla soluzione di sistemi non lineari, che nel caso specifico si verificano in special modo quando la corrente passa più volte attraverso lo stato critico. Nei casi usuali, queste difficoltà possono essere superate mediante una attenta valutazione dei parametri numerici del modello. Raramente, tuttavia, si riesce ad eliminare del tutto una lieve componente di rumore numerico, che si manifesta sotto forma di oscillazioni attorno al valore corretto, la quale può essere tuttavia contenuta in dimensioni tali da non infirmare l'attendibilità dei risultati.

Il modello del National Weather Service degli Stati Uniti è stato messo a punto basandosi sui dati raccolti in occasione di cinque crolli di dighe avvenuti negli Stati Uniti:

- Teton Dam, 1976 (diga in materiali sciolti);
- Buffalo Creek Dam, 1972;
- Johnstown Dam, 1889;
- Toccoa Dam, 1977;
- Laurel Run Dam, 1977.

E' stato inoltre testato con successo su altri crolli avvenuti in Inghilterra e in Cina. Infine, è stato positivamente sperimentato in laboratorio su collassi di dighe in scala ridotta studiati dall'U.S. Corps of Engineers (Waterways Experiment Station).

## 5. - La modellazione numerica

### 5.1. - Parametri adottati nella modellazione numerica

Le caratteristiche dei fanghi contenuti all'interno del bacino sono caratterizzati, nel codice di calcolo DAMBRK, dai seguenti parametri:

- Peso specifico  $\gamma$
- Sforzo tangenziale mobilitante  $\tau_0$
- Viscosità dinamica  $\mu$
- Esponente della curva reologica  $\tau=f(\mu)$

Per l'individuazione dei valori da adottare ci si è riferiti a quanto suggerito in letteratura.

Infatti le caratteristiche reologiche che il materiale disvela durante l'effettivo deflusso in caso di collasso della struttura di contenimento non sono facilmente valutabili mediante analisi dirette del materiale indisturbato sul posto, ma sono desumibili solo a posteriori dall'analisi delle osservazioni delle condizioni di deflusso effettive.

Purtroppo ci sono stati molti casi di bacini di sterili collassati (uno è avvenuto nel 1985 in Val di Stava in Italia) che hanno consentito di redigere diverse statistiche alle quali attingere per reperire le informazioni utili alla parametrizzazione del fenomeno.

Nelle valutazioni del fenomeno, infine, si consideri che nell'incertezza sul valore da attribuire alle grandezze in esame è opportuno adottare parametri cautelativi, che si traducono nel considerare il materiale il più fluido possibile, caratterizzato quindi dai più bassi valori attesi per  $\gamma$ ,  $\tau_0$  e  $\mu$ .

Date le premesse, è stato valutato innanzitutto il peso specifico del materiale che, considerando una percentuale di materiale solido pari al 60% con un proprio peso specifico di 20000 N/mc, porta ad un peso specifico complessivo:

$$\gamma = 16000 \text{ N/mc}$$

Utilizzando il grafico di Fig. 6 e considerando una concentrazione in peso del 60% si desuma uno sforzo tangenziale mobilitante pari a:

$$\tau_0 = 50 \text{ Pa}$$

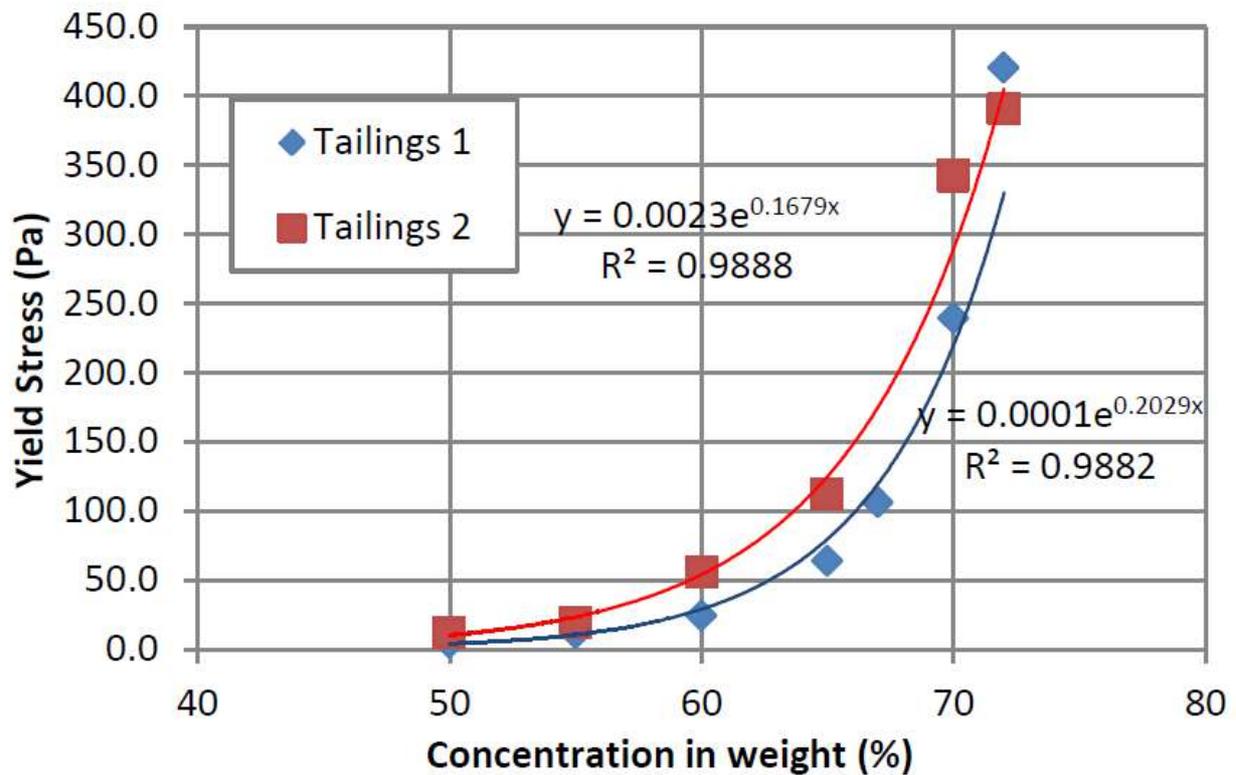


Figura 6 - Relazione tra sforzo tangenziale mobilitante e grado di concentrazione  
[Huamán M, Pulcha D., Meléndez M.: Considerations on dam breach analysis of tailing storage facilities - 3th International Seminar on Tailing Dams]

Per quanto riguarda la viscosità dinamica, utilizzando il grafico riportato in Fig. 7 si desume:

$$\mu = 75 \text{ Pa s}$$

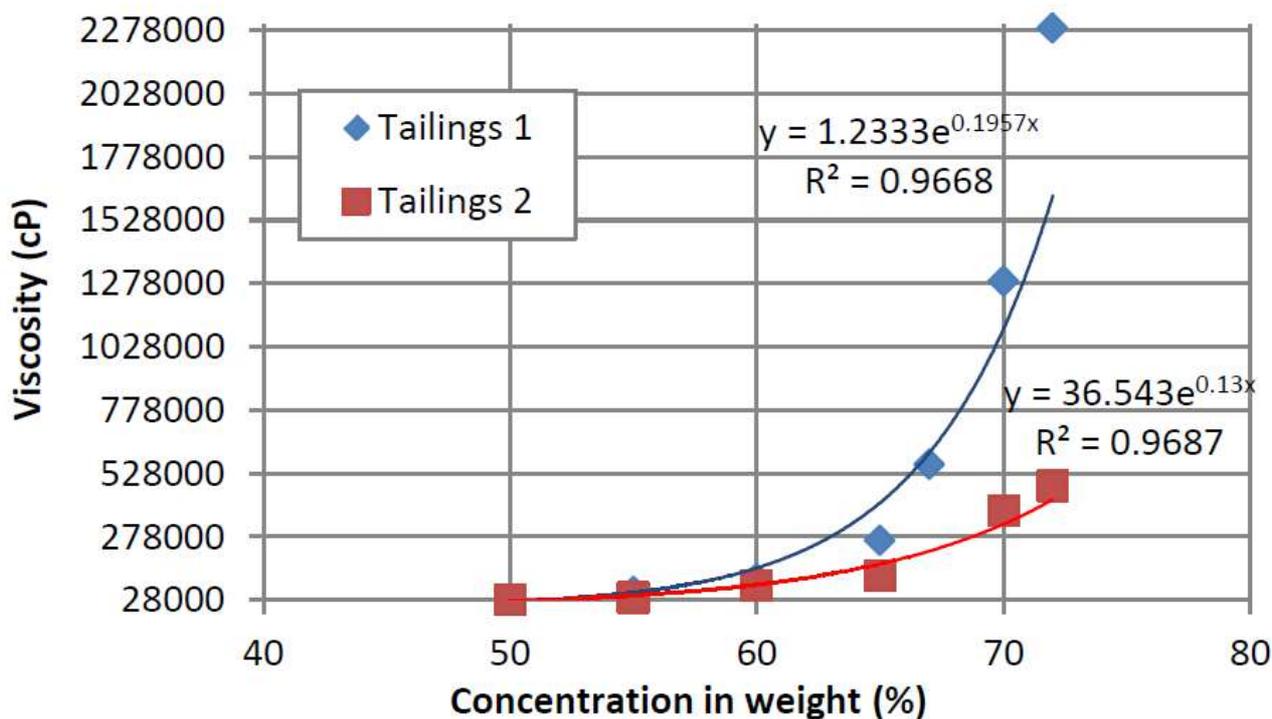


Figura 7 - Relazione tra viscosità dinamica e grado di concentrazione  
 [Huamán M, Pulcha D., Meléndez M.: Considerations on dam breach analysis of tailing storage facilities - 3th International Seminar on Tailing Dams]

Mentre per l'esponente è stato adottato il valore

$$m = 1$$

## 5.2. - Parametri di input e forma dei risultati

L'utilizzazione del modello DAMBRK consiste in pratica nella predisposizione di un file di input contenente le caratteristiche morfologiche e meccaniche dell'invaso, della diga, della breccia che vi si forma e dell'alveo a valle della diga, nonché tutti i parametri idraulici che possono avere rilievo ai fini dell'elaborazione.

I dati morfologici necessari ai fini della simulazione sono stati ricavati dal modello digitale del terreno (DTM) con passo 1 m messo a disposizione nel sito internet della Regione Autonoma della Sardegna.

In particolare, sono state individuate 41 sezioni trasversali, scelte tra le più rappresentative del corso d'acqua, la cui disposizione plano-altimetrica è chiaramente riportata negli All. 3 "Planimetria delle aree allagate" e All. 4 "Profilo".

Le sezioni sono state estratte in ambiente GIS, e sono state successivamente processate numericamente per estrarre per ciascuna 5 coppie di valori di quota – lunghezza del pelo libero, in quanto il codice di calcolo DAMBRK considera la geometria del sistema solo attraverso questa semplificazione.

Oltre alle sezioni assegnate dall'operatore, il modello crea numerose altre sezioni trasversali intermedie, collocandole alle estremità di ognuno dei tratti Dx in cui suddivide l'alveo ai fini dell'integrazione per differenze finite delle equazioni di De Saint Venant. Le sezioni trasversali

create dal programma vengono ricavate mediante una semplice interpolazione lineare fra le sezioni assegnate dall'operatore.

Sulla base dei dati forniti dall'operatore attraverso il file di input, il modello DAMBRK esegue la simulazione e riporta i risultati in un file di output. I risultati del calcolo, così come sono stati prodotti dal programma, sono consegnati nell'All. 3 "Dettaglio dei risultati".

Per consentire una migliore lettura dei risultati delle simulazioni, questi sono stati successivamente elaborati e riproposti in una forma più accessibile (vedi in proposito il paragrafo 6 - Risultati della simulazione).

### **5.3. - Condizioni al contorno**

#### **5.3.1. - Condizioni all'istante 0**

Si è detto in precedenza che, sulla base dei dati di input assegnati dall'utente, il modello DAMBRK determina le condizioni iniziali in ciascuna delle N sezioni di calcolo, rappresentate da quelle assegnate dall'operatore più quelle ottenute per interpolazione dal programma. È a partire da queste condizioni che poi viene calcolato, mediante il procedimento iterativo sopra descritto, l'evolversi dell'onda di piena nell'alveo assegnato.

In particolare, per quanto concerne la portata iniziale in corrispondenza delle N sezioni dell'alveo, il modello assume che questa sia ovunque pari alla portata iniziale che defluisce dallo sfioratore e/o dallo scarico di fondo della diga<sup>1</sup>.

Nel transitorio conseguente il collasso della struttura, il valore iniziale della portata viene fissato dall'utente. Posto che il programma non consente di considerare situazioni di portata nulla, si è assunto che la portata iniziale defluente nell'alveo fosse pari ad 1 mc/s. A questa portata corrispondono tiranti idrici trascurabili, significativamente inferiori a quelli corrispondenti alla piena scaricata durante l'evento, e si può ritenere che la condizione iniziale assunta sia assimilabile a quella di alveo asciutto. Va in ogni caso rimarcato che l'influenza della portata preesistente sulle caratteristiche dell'onda di piena può ritenersi trascurabile ai sensi della individuazione delle altezze d'acqua massime raggiunte ed ai tempi di arrivo dell'onda.

Si consideri, inoltre, che il bacino idrografico sotteso alla sezione di chiusura, pari a meno di 1 kmq, rende ininfluenza la eventuale concomitanza di un evento meteorico anche estremo in concomitanza con il collasso dell'opera di ritenuta.

#### **5.3.2. - Condizioni al contorno nelle sezioni di estremità al variare del tempo**

Illustrando il modello DAMBRK, nel paragrafo 4 si è detto che al fine di rendere possibile la risoluzione del sistema di N-2 equazioni in N incognite derivate dalle equazioni di De Saint Venant, sono richieste due condizioni al contorno. Tali condizioni sono relative una alla sezione iniziale ed una alla sezione finale.

- La condizione al contorno nella sezione iniziale viene fornita al programma assegnandogli tutti i parametri necessari affinché possa calcolare istante per istante la portata di ingresso nella prima sezione di calcolo. Il modello DAMBRK ha essenzialmente due modalità di determinazione delle portate di ingresso nella prima sezione:
  - La prima, di cui si avvale nel caso di simulazione del collasso di uno sbarramento, consiste nella generazione, mediante un algoritmo predefinito, dell'idrogramma delle

<sup>1</sup> Per favorire la stabilità numerica del modello è opportuno che tale portata sia significativamente maggiore di zero

portate effluenti dallo sbarramento, sulla base delle caratteristiche geometriche e idrauliche dello sbarramento e dell'invaso, dell'idrogramma in ingresso all'invaso e dei parametri relativi al collasso dello sbarramento (tempo di rottura, parametri geometrici relativi all'evoluzione della breccia, quota di vaso oltre la quale avviene la rottura).

- La seconda, utilizzata in caso di simulazione di apertura dello scarico di fondo, consiste nella lettura dell'idrogramma di ingresso fornito dall'operatore nella fase di input dei dati.

In entrambi i casi, dunque, il programma ottiene una curva delle portate in funzione del tempo [ $Q=Q(t)$ ], la quale comunque non sarebbe di per sé sufficiente a definire compiutamente le condizioni del moto nella prima sezione, non essendo nota a priori la scala delle portate [ $H=H(Q)$ ].

Il programma risolve questa indeterminazione imponendo per la prima sezione di calcolo la scala delle portate di moto uniforme.

- La condizione al contorno nella sezione finale viene fissata dall'operatore scegliendo fra diverse alternative previste dal programma. Nel caso in esame, come condizione al contorno di valle si è imposta l'esistenza di una scala delle portate di tipo dinamico, caratterizzata dall'andamento a coppia tipico delle onde di piena. In pratica ciò si traduce nell'impiego di una relazione fra portata e tirante idrico formalmente analoga a quella di moto uniforme  $\left( Q = \frac{1}{n} \sigma R^{2/3} \sqrt{J} \text{ (Manning)} \right)$  nella quale però la pendenza motrice  $J = i - \frac{\partial h}{\partial x}$  viene calcolata in funzione delle caratteristiche di accelerazione istantanea della corrente.

Nel presente problema, è stata utilizzata la condizione di collasso della diga.

In particolare, è stata considerata una breccia (vedi Fig. 8) i cui parametri sono i seguenti:

- larghezza alla base (b) = 5 m
- quota del fondo della breccia ( $h_{bm}$ ) = 211.00 m s.l.m.
- quota della sommità della breccia ( $h_o$ ) = 243.00 m s.l.m.
- pendenza delle sponde della breccia (z) = 1
- tempo necessario per lo sviluppo completo della breccia = 1 ora
- istante di inizio di formazione della breccia = ora 0:00

Con riferimento alla durata assunta per il crollo dell'invaso si è tenuto conto del rapporto di D. M. Gee (2008): "Comparison of Dam Breach Parameter Estimators" che riassume e confronta le raccomandazioni dei principali enti governativi statunitensi (Tab. 1).

Dalla lettura della tabella emerge che le dighe in materiali sciolti hanno tempi di sviluppo della breccia che vanno da 0.1 a 4 ore.

Considerando che il materiale contenuto presenta una fluidità ridotta e che il meccanismo di crescita della breccia è alimentato proprio dalla erosione del rilevato ad opera del flusso uscente, si è ritenuto abbastanza cautelativo considerare la durata di 1 ora.

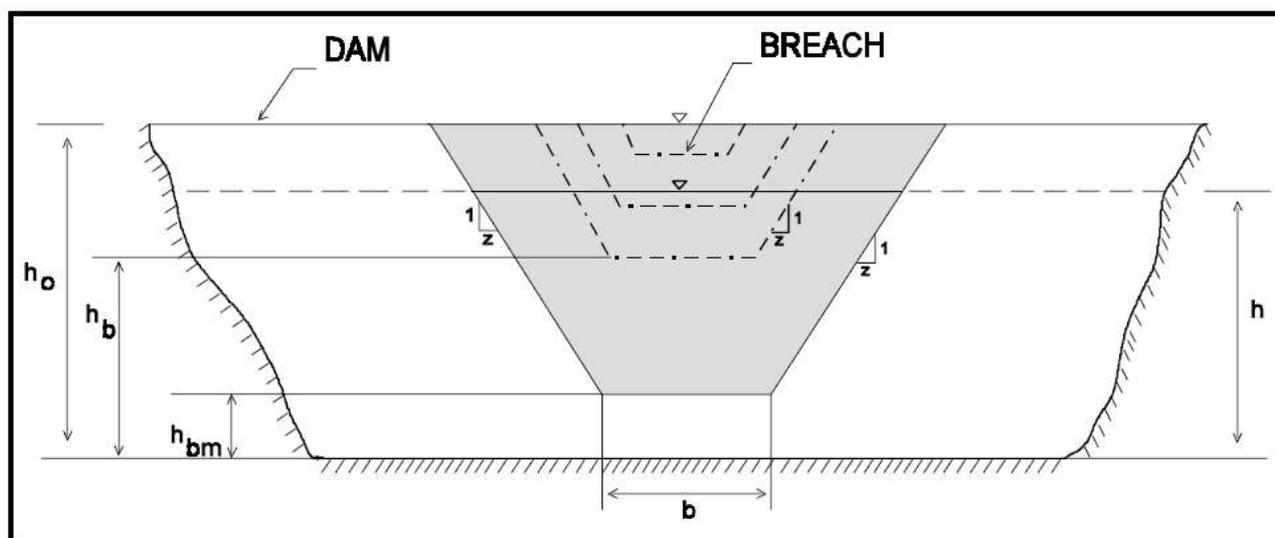


Figura 8 - Schema di formazione della breccia nella diga

Tabella 1 - Parametri caratteristici delle modalità di sviluppo della breccia

**Table 1. Ranges of Possible Values for Breach Characteristics**

Dam Type	Average Breach Width $B_{ave}$	Horizontal Component of Breach Side Slope (H:1V)	Failure Time $t_f$ (hrs)	Agency
Earthen/ Rockfill	$(0.5 \text{ to } 3.0) \times HD$	0 to 1.0	0.5 to 4.0	USACE (1980)
	$(0.5 \text{ to } 5.0) \times HD$	0 to 1.0	0.1 to 4.0*	USACE (2007)
	$(1.0 \text{ to } 5.0) \times HD$	0 to 1.0	0.1 to 1.0	FERC (1988)
	$(2.0 \text{ to } 5.0) \times HD$	0 to 1.0 (slightly larger)	0.1 to 1.0	NWS (Fread, 2006)
Concrete Gravity	Multiple Monoliths	Vertical	0.1 to 0.5	USACE (2007)
	Usually $\leq 0.5 L$	Vertical	0.1 to 0.3	FERC
	Usually $< 0.5 L$	Vertical	0.1 to 0.2	NWS
Concrete Arch	Entire Dam	Valley wall slope	$\leq 0.1$	USACE (1980)
	$(0.8 \times L)$ to $L$	0 to valley walls	$< 0.1$	USACE (2007)
	Entire Dam	0 to valley walls	$\leq 0.1$	FERC
Slag/ Refuse	$(0.8 \times L)$ to $L$	0 to valley walls	$< 0.1$	NWS
	$(0.8 \times L)$ to $L$	1.0 to 2.0	0.1 to 0.3	FERC
	$(0.8 \times L)$ to $L$		$\leq 0.1$	NWS

Where: HD = Height of the dam.

L = Length of the dam crest.

## 5.4. - Rappresentazione della morfologia e delle caratteristiche idrauliche dell'alveo

Si è detto precedentemente che la morfologia dell'alveo è stata assegnata al programma tramite l'inserimento nel file di input delle caratteristiche geometriche di 41 sezioni.

Va detto a questo proposito che il programma impone alcune schematizzazioni nell'input della geometria delle sezioni trasversali:

- La geometria delle sezioni viene specificata attraverso un vettore di quote ed un vettore di

larghezze che la sezione considerata presenta in corrispondenza a tali quote. Pertanto, ai fini del calcolo, è come se tutte le sezioni fossero esattamente simmetriche.

- Il numero delle quote, e corrispondentemente delle larghezze, deve essere costante per tutte le sezioni assegnate.
- Non è possibile fornire due larghezze differenti per una stessa quota. Pertanto, in corrispondenza di zone da potersi considerare, ai fini del rilievo, a quota costante, qualora il valore di tale quota si presentasse come valore di input per il programma, si è assunta una larghezza intermedia fra le due disponibili come valore massimo e minimo.

Dovendo sottostare alle schematizzazioni suddette, è stato necessario semplificare le sezioni trasversali per adeguarle ai vincoli imposti dal modello.

Riguardo alla valutazione delle perdite di carico dovute alla scabrezza dell'alveo, queste vengono calcolate dal modello mediante la formula di Manning, già richiamata.

La valutazione del coefficiente di scabrezza  $n$  da assegnare al modello richiede una particolare cautela, in quanto il valore di  $n$  ha una influenza non trascurabile sui risultati della simulazione, in special modo per quanto riguarda i tratti più vallivi dell'alveo. Nel caso dell'alveo in esame, si è avuto modo di constatare che nell'ipotesi di collasso strutturale delle dighe, facendo variare il valore di  $n$  fra 0.045 e 0.07, si avevano delle escursioni del tirante idrico nelle sezioni più a valle dell'ordine dei 3,4 metri.

La letteratura, in particolare anglosassone, in materia di scelta del coefficiente di scabrezza più adatto a rappresentare le caratteristiche fisiche di un alveo naturale, fornisce delle indicazioni non del tutto univoche. Il Prof. Dino Tonini, nell'opera "Elementi di Idrografia ed Idrologia" (1959), riportando una tabella contenuta nell'opera fondamentale del Prof. Ven Te Chow, "Open-Channels Hydraulics" (1959), indica per "alvei a debole pendenza, con vegetazione abbastanza diffusa e fondo non uniforme" valori di  $n$  variabili tra 0.05 e 0.08. Lo stesso Prof. Chow, in "Open-Channels Hydraulics", presenta anche un metodo sviluppato da Woody L. Cowan per il calcolo del valore di  $n$ , metodo ancor oggi utilizzato dal U.S. Soil Conservation Service. Secondo questo metodo, ad ogni elemento che influenza la scabrezza di un alveo viene associato un contributo di scabrezza, e la scabrezza complessiva viene calcolata tramite l'espressione

$$n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) n_6$$

dove  $n$  è il coefficiente di Manning complessivo, mentre gli  $n_i$  sono i contributi dovuti a

- materiale dell'alveo;
- grado di irregolarità della superficie dell'alveo
- variazione della sezione;
- ostacoli, ostruzioni ed irregolarità locali;
- vegetazione sulle golene;
- tortuosità.

I valori tipici dei valori di  $n_i$  sono riportati in Tab. 2.

Tabella 2 - Valori per il calcolo del coefficiente di scabrezza di Manning secondo il metodo seguito dal U.S. Soil Conservation Service

Condizioni dell'alveo		Valori	
Materiale dell'alveo	Terra	n1	0.020
	Roccia tagliata		0.025
	Ghiaia fine		0.024
	Ghiaia grossolana		0.028
Grado di irregolarità dell'alveo	Trascurabile	n2	0.000
	Modesto		0.005
	Moderato		0.010
	Rilevante		0.020
Variazione della sezione	Graduale	n3	0.000
	Con alternanza occasionale		0.005
	Con alternanza frequente		0.010 , 0.015
Effetto relativo delle ostruzioni	Trascurabile	n4	0.000
	Modesto		0.010 , 0.015
	Apprezzabile		0.020 , 0.030
	Rilevante		0.040 , 0.060
Vegetazione	Bassa	n5	0.005 , 0.010
	Media		0.010 , 0.025
	Alta		0.025 , 0.050
	Molto alta		0.050 , 0.100
Tortuosità	Modesta	n6	1.000
	Apprezzabile		1.150
	Rilevante		1.300

Nel caso in esame, assumendo

- |                                     |                            |               |
|-------------------------------------|----------------------------|---------------|
| • materiale dell'alveo              | roccia tagliata            | $n_1 = 0.025$ |
| • grado di irregolarità dell'alveo  | modesto                    | $n_2 = 0.005$ |
| • variazione della sezione          | con alternanza occasionale | $n_3 = 0.005$ |
| • effetto relativo delle ostruzioni | trascurabile, modesto      | $n_4 = 0.005$ |
| • vegetazione                       | media                      | $n_5 = 0.020$ |
| • tortuosità                        | modesta                    | $n_6 = 1.000$ |

si ottiene un valore di  $n$  pari a 0.06, che è poi quello che è stato adottato nella simulazione per tutte le sezioni dell'alveo.

## 6. - Risultati della simulazione

### 6.1. - Onda di piena in uscita dal bacino

La piena in uscita dal bacino è stimata considerando la evoluzione temporale della dimensione della breccia e la curva di invaso del lago, riportata in Tab. 3.

*Tabella 3 - Curva di invaso del Bacino Sterili*

H	S
m s.l.m.	m <sup>3</sup>
210	1'074
215	5'882
220	19'591
225	39'097
230	61'477
235	88'929
240	118'025
245	157'110

Il codice effettua il calcolo della portata in uscita dal lago questa analisi prima di eseguire la simulazione del moto nell'alveo a valle, effettuando una stima della quota idrica che si determinerà a valle del lago.

In Tab. 4 si riportano gli andamenti nel tempo delle grandezze che descrivono la formazione dell'idrogramma in uscita dal lago.

*Tabella 4 - Elementi caratteristici dell'idrogramma in uscita dal lago*

tempo	quota fondo breccia	larghezza fondo breccia	quota invaso a monte	quota stimata a valle	portata	volume rilasciato
ore	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m s.l.m.	mc/s	Mmc
0.00	243.10	0.00	243.00	204.29	0	0.00
0.02	242.46	0.10	243.00	204.33	0	0.00
0.04	241.82	0.20	243.00	204.47	3	0.00
0.06	241.17	0.30	243.00	204.65	7	0.00
0.08	240.53	0.40	242.99	204.83	15	0.00
0.10	239.89	0.50	242.98	205.03	27	0.00
0.12	239.25	0.60	242.96	205.24	43	0.00
0.14	238.61	0.70	242.94	205.46	64	0.00
0.16	237.96	0.80	242.90	205.68	88	0.00
0.18	237.32	0.90	242.85	205.91	117	0.00
0.20	236.68	1.00	242.78	206.15	150	0.00
0.22	236.04	1.10	242.69	206.38	187	0.00
0.24	235.40	1.20	242.59	206.61	227	0.10
0.26	234.75	1.30	242.46	206.84	270	0.10
0.28	234.11	1.40	242.30	207.06	316	0.10

tempo	quota fondo breccia	larghezza fondo breccia	quota invaso a monte	quota stimata a valle	portata	volume rilasciato
ore	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m s.l.m.	mc/s	Mmc
0.30	233.47	1.50	242.12	207.27	363	0.10
0.32	232.83	1.60	241.91	207.48	412	0.20
0.34	232.19	1.70	241.68	207.67	460	0.20
0.36	231.54	1.80	241.41	207.86	509	0.20
0.38	230.90	1.90	241.11	208.03	557	0.30
0.40	230.26	2.00	240.78	208.18	602	0.30
0.42	229.62	2.10	240.41	208.33	646	0.30
0.44	228.98	2.20	240.01	208.46	686	0.40
0.46	228.33	2.30	239.58	208.57	722	0.40
0.48	227.69	2.40	239.11	208.67	756	0.50
0.50	227.05	2.50	238.62	208.76	785	0.50
0.52	226.41	2.60	238.09	208.83	809	0.60
0.54	225.77	2.70	237.53	208.89	829	0.70
0.56	225.12	2.80	236.94	208.93	845	0.70
0.58	224.48	2.90	236.32	208.96	855	0.80
0.60	223.84	3.00	235.67	208.97	861	0.80
0.62	223.20	3.10	234.99	208.98	862	0.90
0.64	222.56	3.20	234.28	208.96	858	1.00
0.66	221.91	3.30	233.54	208.94	849	1.00
0.68	221.27	3.40	232.77	208.90	835	1.10
0.70	220.63	3.50	231.97	208.85	817	1.20
0.72	219.99	3.60	231.14	208.78	793	1.20
0.74	219.35	3.70	230.28	208.70	766	1.30
0.76	218.70	3.80	229.39	208.61	734	1.30
0.78	218.06	3.90	228.47	208.50	700	1.40
0.80	217.42	4.00	227.53	208.38	663	1.40
0.82	216.78	4.10	226.57	208.26	624	1.50
0.84	216.14	4.20	225.58	208.12	583	1.50
0.86	215.49	4.30	224.56	207.97	539	1.60
0.88	214.85	4.40	223.51	207.80	494	1.60
0.90	214.21	4.50	222.43	207.62	447	1.60
0.92	213.57	4.60	221.31	207.43	399	1.70
0.94	212.93	4.70	220.14	207.21	348	1.70
0.96	212.28	4.80	218.90	206.97	296	1.70
0.98	211.64	4.90	217.62	206.71	245	1.70
1.00	211.00	5.00	216.26	206.42	193	1.70
1.02	211.00	5.00	214.87	205.85	108	1.80
1.04	211.00	5.00	213.77	205.40	58	1.80
1.06	211.00	5.00	213.05	205.12	34	1.80
1.08	211.00	5.00	212.56	204.93	21	1.80
1.10	211.00	5.00	212.23	204.80	14	1.80
1.12	211.00	5.00	211.99	204.71	10	1.80
1.14	211.00	5.00	211.82	204.64	7	1.80

tempo	quota fondo breccia	larghezza fondo breccia	quota invaso a monte	quota stimata a valle	portata	volume rilasciato
ore	m s.l.m.	m	m s.l.m.	m s.l.m.	mc/s	Mmc
1.16	211.00	5.00	211.71	204.58	6	1.80
1.18	211.00	5.00	211.62	204.54	5	1.80
1.20	211.00	5.00	211.55	204.51	4	1.80
1.22	211.00	5.00	211.51	204.49	3	1.80
1.24	211.00	5.00	211.47	204.47	3	1.80
1.26	211.00	5.00	211.44	204.46	3	1.80
1.28	211.00	5.00	211.42	204.45	3	1.80
1.30	211.00	5.00	211.41	204.44	2	1.80
1.32	211.00	5.00	211.40	204.44	2	1.80
1.34	211.00	5.00	211.39	204.43	2	1.80
1.36	211.00	5.00	211.38	204.43	2	1.80
1.38	211.00	5.00	211.38	204.42	2	1.80
1.40	211.00	5.00	211.37	204.42	2	1.80
1.42	211.00	5.00	211.37	204.42	2	1.80
1.44	211.00	5.00	211.37	204.42	2	1.80
1.46	211.00	5.00	211.37	204.42	2	1.80
1.48	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.50	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.52	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.54	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.56	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.58	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.60	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.62	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.64	211.00	5.00	211.36	204.42	2	1.80
1.66	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.68	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.70	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.72	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.74	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.76	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.78	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.80	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.82	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.84	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.86	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.88	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.90	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.92	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.94	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.96	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
1.98	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80
2.00	211.00	5.00	211.36	204.41	2	1.80

## 6.2. - Caratteristiche del moto lungo l'alveo

Nella Tab. 5 Sono riportati i valori massimi di portata, velocità e livello raggiunti in ogni sezione, e l'istante in cui il massimo di verifica.

Tabella 5 - Sintesi dei valori massimi raggiunti dalla corrente durante la simulazione in tutte le sezioni

Sezioni (comprese le interpolate)	Sezioni di input	Progressiva	Portata al colmo	Istante della portata al colmo	quota del fondo alveo	massimo livello idrico	massima altezza idrica sul fondo	velocità massima
		km	mc/s	h	m slm	m slm	m	m/s
1	1	0.000	861	0.620	204.00	208.25	4.25	8.47
2	2	0.070	861	0.620	198.16	203.53	5.37	7.46
3	3	0.140	861	0.620	194.00	199.62	5.62	7.18
4		0.153	861	0.620	193.46	198.97	5.51	7.09
5		0.167	861	0.620	192.92	198.30	5.38	6.98
6		0.180	861	0.620	192.37	197.61	5.24	6.86
7		0.193	861	0.620	191.84	196.89	5.05	6.71
8		0.207	861	0.624	191.29	196.13	4.84	6.55
9		0.220	861	0.624	190.75	195.34	4.59	6.34
10		0.233	861	0.624	190.21	194.50	4.29	6.09
11		0.247	861	0.624	189.66	193.63	3.97	5.72
12	4	0.260	861	0.624	189.12	192.87	3.75	4.82
13	5	0.360	861	0.624	182.68	187.46	4.78	5.36
14	6	0.450	861	0.632	178.60	183.74	5.14	3.18
15		0.470	861	0.632	178.19	183.10	4.91	3.43
16		0.490	861	0.632	177.77	182.46	4.69	3.58
17		0.510	861	0.632	177.35	181.84	4.49	3.63
18		0.530	861	0.636	176.94	181.25	4.31	3.62
19		0.550	861	0.636	176.51	180.65	4.14	3.62
20	7	0.570	861	0.636	176.10	180.00	3.90	3.77
21	8	0.660	861	0.636	172.37	176.86	4.49	4.26
22	9	0.770	861	0.644	169.15	173.05	3.90	4.33
23		0.825	861	0.648	166.31	171.41	5.10	4.19
24	10	0.880	861	0.648	163.47	169.99	6.52	4.56
25	11	0.950	861	0.648	161.02	167.46	6.44	7.31
26	12	1.070	860	0.656	156.43	161.92	5.49	5.85
27	13	1.170	860	0.660	152.58	159.00	6.42	4.42
28	14	1.270	860	0.660	149.92	155.61	5.69	7.61
29	15	1.410	860	0.664	142.98	148.52	5.54	21.95 (*)
30	16	1.500	860	0.664	137.12	144.51	7.39	7.96
31	17	1.620	860	0.672	133.47	138.69	5.22	39.96 (*)
32	18	1.760	860	0.676	126.56	134.74	8.18	4.83
33	19	1.870	860	0.680	125.02	131.74	6.72	8.05
34		1.965	860	0.684	121.78	127.83	6.05	5.52

Sezioni (comprese le interpolate)	Sezioni di input	Progressiva	Portata al colmo	Istante della portata al colmo	quota del fondo alveo	massimo livello idrico	massima altezza idrica sul fondo	velocità massima
		km	mc/s	h	m slm	m slm	m	m/s
35	20	2.060	860	0.676	118.53	122.80	4.27	7.34
36	21	2.250	859	0.700	112.71	117.55	4.84	2.56
37	22	2.449	859	0.704	108.06	112.86	4.80	5.58
38	23	2.549	859	0.716	106.18	110.72	4.54	2.28
39	24	2.689	858	0.724	103.56	108.38	4.82	3.29
40		2.779	858	0.728	101.53	106.48	4.95	3.28
41	25	2.869	858	0.736	99.50	105.01	5.51	2.73
42		2.916	857	0.740	98.85	104.38	5.53	2.84
43		2.963	857	0.740	98.18	103.69	5.51	3.05
44	26	3.009	857	0.744	97.53	102.84	5.31	3.55
45	27	3.089	857	0.748	95.29	100.65	5.36	7.07
46	28	3.209	857	0.756	91.94	98.28	6.34	3.10
47	29	3.309	856	0.760	90.83	96.85	6.02	3.43
48	30	3.519	856	0.768	87.23	92.92	5.69	4.04
49	31	3.689	855	0.780	83.70	90.12	6.42	3.14
50		3.769	855	0.784	82.58	89.08	6.50	3.25
51	32	3.849	854	0.788	81.46	87.62	6.16	3.83
52		3.939	854	0.792	80.09	85.60	5.51	3.56
53	33	4.029	855	0.780	78.72	83.88	5.16	3.26
54	34	4.139	851	0.920	77.79	81.68	3.89	2.63
55		4.155	848	0.948	77.60	81.48	3.88	1.77
56		4.171	845	0.964	77.42	81.35	3.93	1.32
57		4.187	840	0.976	77.23	81.26	4.03	1.03
58		4.203	833	0.984	77.04	81.19	4.15	0.82
59		4.219	824	0.988	76.86	81.13	4.27	0.66
60		4.235	813	0.992	76.67	81.07	4.40	0.54
61		4.251	800	0.996	76.48	81.02	4.54	0.43
62		4.267	785	0.996	76.30	80.98	4.68	0.35
63		4.283	769	0.996	76.12	80.94	4.82	0.28
64	35	4.299	753	1.000	75.93	80.90	4.97	0.23
65	36	4.449	677	1.008	75.74	80.55	4.81	0.43
66	37	4.599	661	1.016	75.51	80.02	4.51	0.63
67	38	4.679	657	1.024	75.54	79.63	4.09	0.84
68		4.688	657	1.024	75.53	79.57	4.04	0.84
69		4.698	656	1.028	75.53	79.51	3.98	0.85
70		4.707	656	1.028	75.53	79.45	3.92	0.85
71		4.716	656	1.028	75.53	79.39	3.86	0.84
72		4.725	655	1.032	75.53	79.33	3.80	0.84
73		4.735	655	1.032	75.51	79.27	3.76	0.83
74		4.744	655	1.032	75.51	79.21	3.70	0.82
75		4.753	654	1.036	75.51	79.14	3.63	0.81
76		4.763	654	1.036	75.51	79.07	3.56	0.79
77		4.772	654	1.036	75.51	79.01	3.50	0.76

Sezioni (comprese le interpolate)	Sezioni di input	Progressiva	Portata al colmo	Istante della portata al colmo	quota del fondo alveo	massimo livello idrico	massima altezza idrica sul fondo	velocità massima
		km	mc/s	h	m slm	m slm	m	m/s
78		4.781	653	1.040	75.50	78.94	3.44	0.73
79		4.790	653	1.040	75.49	78.88	3.39	0.68
80		4.800	652	1.040	75.49	78.82	3.33	0.62
81	39	4.809	652	1.044	75.49	78.76	3.27	0.56
82		4.819	652	1.044	75.44	78.72	3.28	0.57
83		4.829	651	1.044	75.39	78.66	3.27	0.58
84		4.839	651	1.044	75.34	78.61	3.27	0.59
85		4.849	651	1.044	75.29	78.55	3.26	0.61
86		4.859	650	1.048	75.24	78.49	3.25	0.63
87		4.869	650	1.048	75.19	78.42	3.23	0.65
88		4.879	650	1.048	75.14	78.35	3.21	0.68
89		4.889	649	1.048	75.09	78.27	3.18	0.71
90		4.899	649	1.048	75.04	78.19	3.15	0.74
91		4.909	649	1.052	74.99	78.11	3.12	0.77
92		4.919	649	1.052	74.94	78.02	3.08	0.81
93		4.929	649	1.052	74.88	77.92	3.04	0.85
94		4.939	649	1.052	74.84	77.82	2.98	0.90
95		4.949	649	1.052	74.79	77.71	2.92	0.96
96		4.959	648	1.052	74.74	77.59	2.85	1.03
97		4.969	648	1.056	74.69	77.46	2.77	1.11
98		4.979	648	1.056	74.64	77.31	2.67	1.22
99		4.989	648	1.056	74.59	77.12	2.53	1.38
100		4.999	648	1.056	74.54	76.88	2.34	1.64
101	40	5.009	648	1.056	74.49	76.51	2.02	2.24
102		5.019	648	1.056	73.92	75.98	2.06	2.28
103		5.029	648	1.060	73.35	75.47	2.12	2.32
104		5.039	648	1.060	72.78	74.98	2.20	2.35
105		5.049	648	1.060	72.21	74.51	2.30	2.36
106		5.059	648	1.060	71.64	74.08	2.44	2.34
107		5.069	648	1.064	71.07	73.71	2.64	2.30
108		5.079	648	1.064	70.50	73.39	2.89	2.28
109		5.089	648	1.064	69.93	73.10	3.17	2.37
110		5.099	648	1.064	69.36	72.83	3.47	2.74
111	41	5.109	648	1.064	68.79	72.46	3.67	4.07

(\*) nota: nelle sezioni 15 e 17 si indica una velocità massima molto elevata. Si tratta di un transitorio che si verifica nella fase di morbida dovuto presumibilmente a una instabilità numerica, e non riguarda il transito dell'onda di piena principale. Si ritiene che tale dato non sia da considerarsi attendibile.

Il dettaglio dei risultati sezione per sezione sono riportati invece nelle Tab. 6 e 7.





## 7. - Considerazioni conclusive

Si ribadisce che il presente studio non affronta la probabilità che avvenga il collasso della struttura di contenimento del Bacino Sterili, ma solo delle modalità con le quali il materiale viene rilasciato verso valle nel caso in cui tale evento si verifichi.

L'analisi svolta ha evidenziato che, nell'ipotesi di collasso della struttura di ritenuta del Bacino Sterili, il materiale viene rilasciato a valle con una fluidità sufficiente a fargli percorrere tutta l'asta analizzata di 5 km in meno di mezz'ora.

Il materiale, inoltre, scorre interamente verso valle, senza accumuli residui lungo la vallata, ed andrebbe a depositarsi quasi integralmente all'interno della traversa sul Fluminimannu a Casa Fiume.

Il bacino sotteso da quest'ultima traversa presenta infatti una capacità di 750'000 mc, pari a circa la metà del volume contenuto nel Bacino Sterili. Questo volume si dovrebbe presentare colmo d'acqua, ma il maggiore peso specifico dei fanghi rilasciati dovrebbe portare al loro accumulo all'interno dell'invaso con espulsione della più leggera acqua presente all'interno.

A valle della traversa troviamo il Fluminimannu ma anche i due canali adduttori che portano le acque del sistema Flumendosa-Mulargia a tutto il Campidano.

La dinamica del sistema idraulico non è stata affrontata in questo studio, ma c'è da attendersi che i fanghi vadano a trasferirsi sia sui due canali, che nel Fluminimannu a valle, almeno per il volume eccedente la capacità della traversa.

Una considerazione merita la natura del materiale presente all'interno del Bacino.

Si tratta di un materiale con caratteristiche reologiche alquanto differenti da quelle dell'acqua, presentando innanzitutto una resistenza di taglio che, fintanto che non viene vinta, fa mantenere al materiale l'aspetto solido e non liquido. Nel momento in cui, invece, tale sforzo tangenziale viene vinto, la corrente presenta una viscosità molto maggiore di quella dell'acqua (75'000 volte maggiore).

L'aspettativa potrebbe essere che in caso di collasso della struttura di contenimento il materiale possa per lo più restare sul posto, o scorrere solo un po' verso valle distribuendosi lungo un breve tratto a valle dell'invaso.

La realtà però è che l'esperienza dei crolli di bacini minerari osservati in passato ha mostrato che anche quelli al cui interno il materiale aveva avuto parecchi anni per stabilizzarsi, a seguito del collasso hanno mostrato una mobilità abbastanza simile a quella dell'acqua, con velocità di scorrimento e scarsi accumuli immediatamente a valle dell'invaso.

Il risultato qui conseguito appare pertanto verosimile, oltre che in base all'analisi numerica, anche alla luce degli eventi osservati in passato.