

DIGA DEL TUL

ADEGUAMENTO DELLA SICUREZZA IDRAULICA

PROGETTO ESECUTIVO

RELAZIONE IDRAULICA



Ing. Claudio Marcello S.r.l.



STUDIO MEDA S.r.l. unipersonale

MILANO, OTTOBRE 2019

INDICE

1.	PREMESSA.....	1
2.	LE OPERE DI SCARICO	2
2.1.	SCARICO DI SUPERFICIE NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE	2
2.2.	SCARICO DI MEZZOFONDO	3
2.3.	SCARICO DI FONDO	5
2.4.	CAPACITÀ ATTUALE DELLE OPERE DI SCARICO	7
3.	SCARICO DI SUPERFICIE NELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO.....	8
4.	EVACUAZIONE DELL'ONDA DI PIENA DI PROGETTO	11
5.	VERIFICHE DEL FRANCO DA NORMATIVA	12
6.	VERIFICHE DELL'ALVEO DI VALLE.....	14

1. PREMESSA

Con nota prot. 1957 del 05.09.2017 la Direzione Generale per le Dighe ha approvato i seguenti studi idrologici ed idraulici:

- "Consulenza tecnico scientifica ai fini della valutazione della massima piena per la diga di Tul" – Prof. Renzo Rosso (marzo 2006)
- "Diga del Tul - Rivalutazione della sicurezza idraulica" – Ing. Claudio Marcello S.r.l. (marzo 2006)

con cui sono state rivalutate le possibili piene in ingresso al serbatoio per differenti tempi di ritorno, così come le scale delle portate degli scarichi della diga, e il conseguente grado di sicurezza idraulica dello sbarramento.

Da questi studi è emersa l'insufficiente capacità di scarico della diga a fronte di piene con elevati tempi di ritorno.

Il presente progetto ha pertanto adeguato la capacità di scarico della diga per una piena con tempo di ritorno 500 anni, avente portata al colmo di 248 m³/s, come intervento di miglioramento della sicurezza idraulica conforme al punto H.2.2. del D.M. 26.06.2014.

Nella presente relazione vengono descritti gli scarichi della diga e riportate le loro scale delle portate (§ 2), e per lo scarico di superficie, unico interessato dagli interventi in progetto, anche nella configurazione a lavori ultimati (§ 3). Viene poi simulato l'ingresso al serbatoio dell'onda di piena Tr 500 anni nella configurazione di progetto, così da determinare la nuova quota di massimo invaso (§ 4).

Si riporta quindi la verifica del rispetto del franco previsto dalla normativa vigente, unitamente alla determinazione dell'evento di piena che determina l'annullamento del franco (§ 5).

Infine, viene riportata la verifica dei livelli idrici nell'alveo di valle a dimostrazione della compatibilità con gli accessi alla diga e la Centrale di Mulinars (§ 6).

2. LE OPERE DI SCARICO

La diga ha tre opere di scarico: uno scarico di superficie, uno scarico di mezzofondo e uno scarico di fondo.

2.1. SCARICO DI SUPERFICIE NELLA CONFIGURAZIONE ATTUALE

Lo scarico di superficie è costituito da uno sfioratore in fregio allo sbarramento con una luce centrale di 17,25 m, con quota del ciglio a 268,10 m s.m.

Nella parte centrale dello sfioratore una soletta in calcestruzzo armato rivestita in pietra dura provvede ad allontanare la lama stramazante dall'unghia di valle della diga, come si può vedere in Figura 1.



Figura 1 – Vista da monte dello sfioratore

In Figura 2 è riportata una vista schematica da valle dello sfioratore.

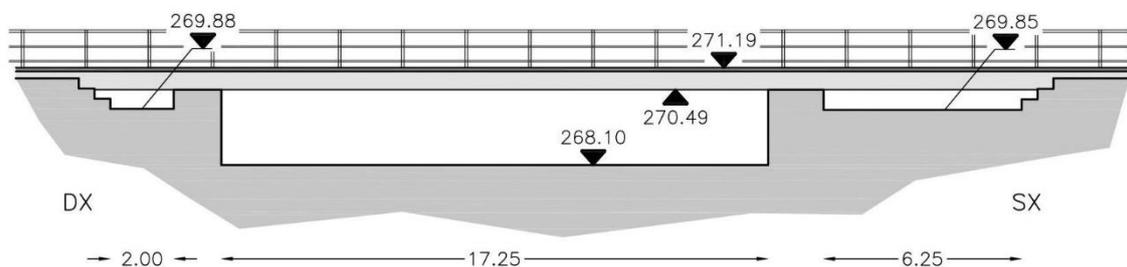


Figura 2 – Vista da valle sfioratore (stato di fatto)

Ai lati della luce centrale ne sono presenti altre due, sempre in corpo diga, con soglia a quota 269,88 m s.m. in destra e 269,85 m s.m. in sinistra, larghe: 2,00 m quella in destra e

6,25 m quella in sinistra. Queste luci continuano verso le spalle con piccoli gradoni (v. Figura 2).

Il coronamento è costituito da una passerella pedonale in calcestruzzo armato, che appoggia su due pile di sostegno che si innalzano dai bordi laterali delle soglie; l'estradosso della passerella, larga 1,00 m, è a 271,19 m s.m. ed il suo spessore è di 70 cm.

In Figura 3 si riporta la scala delle portate dello scarico di superficie nella configurazione attuale, determinata dagli studi di "Rivalutazione della sicurezza idraulica" del 2006.

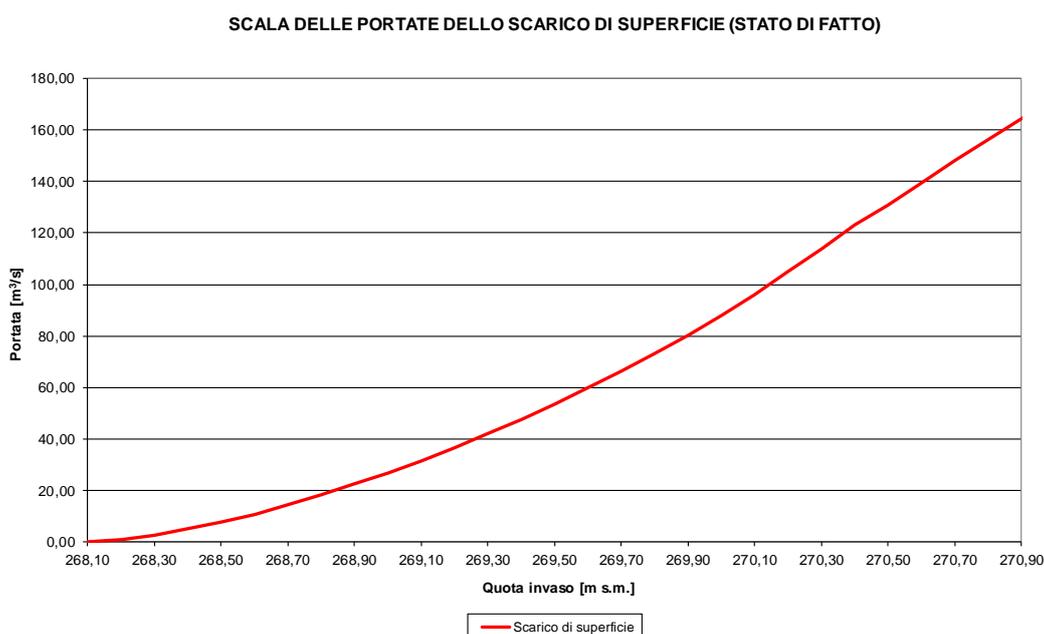


Figura 3 – Scala delle portate dello scarico di superficie (stato di fatto)

2.2. SCARICO DI MEZZOFONDO

Lo scarico di mezzofondo è ubicato in sponda destra circa 25 m a monte della diga, e consta di un manufatto di imbocco con soglia a 259,50 m s.m., seguito da una galleria del diametro di 1,80 m, lunga 75,80 m e con pendenza dello 0,8%.

Nel manufatto di imbocco sono ubicate due paratoie piane in serie di dimensioni 1,40 x 1,10 m (altezza x larghezza); non è però possibile la loro apertura per un'altezza maggiore di 1,15 m.

In Figura 4 e Figura 5 si riportano le sezioni longitudinale e trasversale del manufatto di imbocco di questo scarico.

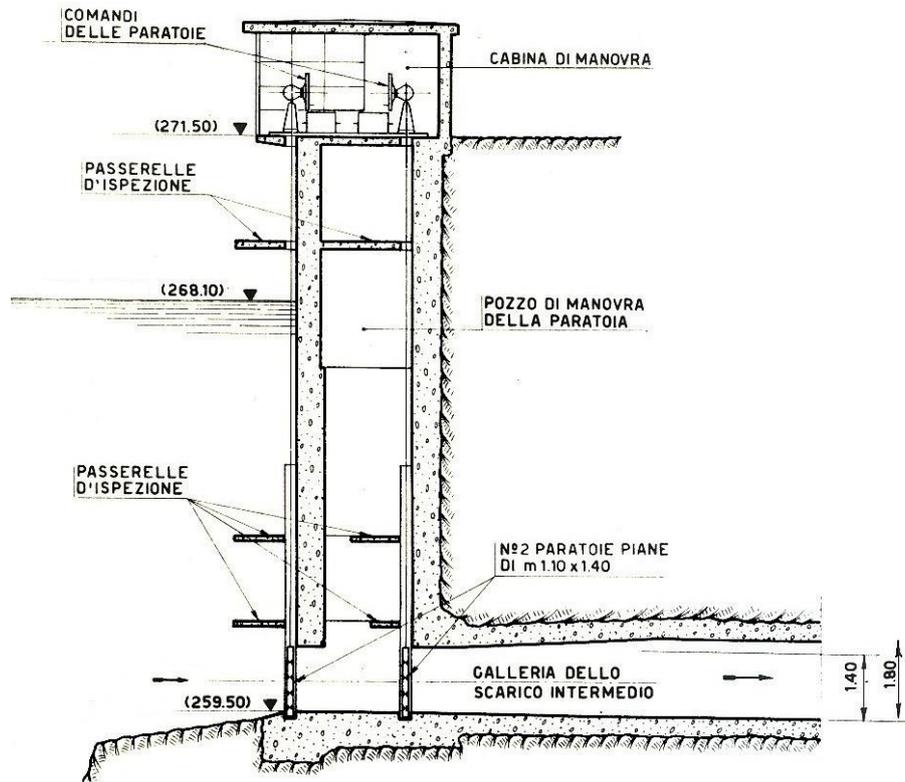


Figura 4 – Sezione longitudinale imbocco scarico di mezzofondo

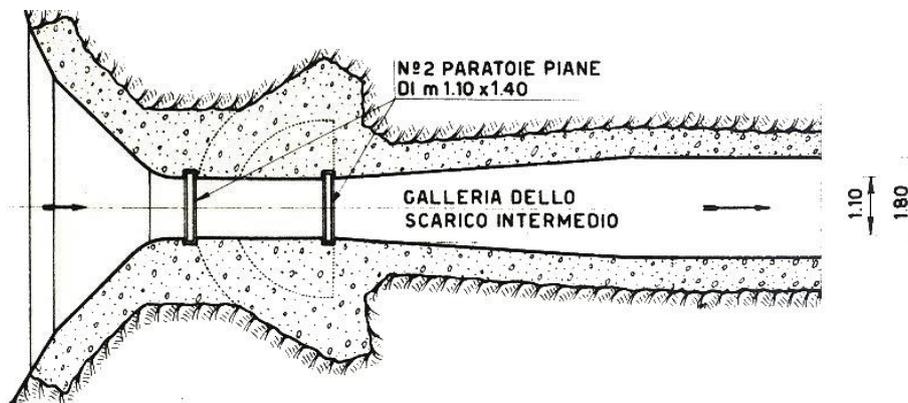


Figura 5 – Sezione trasversale imbocco scarico di mezzofondo

In Figura 6 si può invece vedere un'immagine della cabina di manovra di questo scarico.



Figura 6 – Cabina di manovra scarico di mezzofondo

In Figura 7 si riporta la scala delle portate dello scarico di mezzofondo, determinata in base agli studi di “Rivalutazione della sicurezza idraulica” del 2006, avendo però considerato la massima apertura delle paratoie limitata a 1,15 m (informazione non disponibile nel 2006).

SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO DI MEZZOFONDO

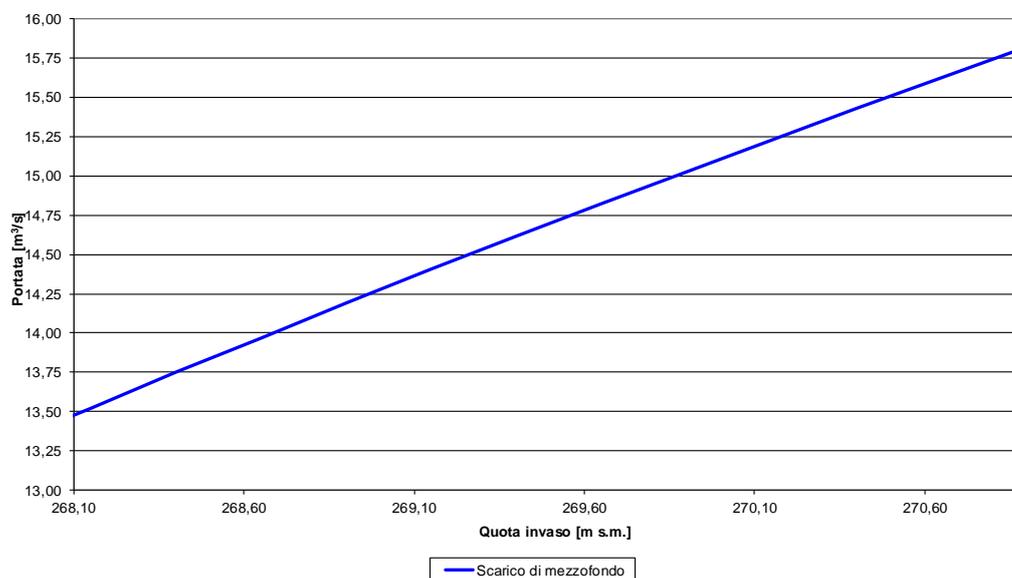


Figura 7 – Scala delle portate dello scarico di mezzofondo

2.3. SCARICO DI FONDO

Lo scarico di fondo è costituito da una tubazione metallica del diametro di 1,00 m, lunga 2,60 m e con soglia a 258,00 m s.m., attraversante l'imposta sinistra dell'arco inferiore dello sbarramento.

In Figura 8 è riportata una sezione longitudinale in asse a questo scarico.

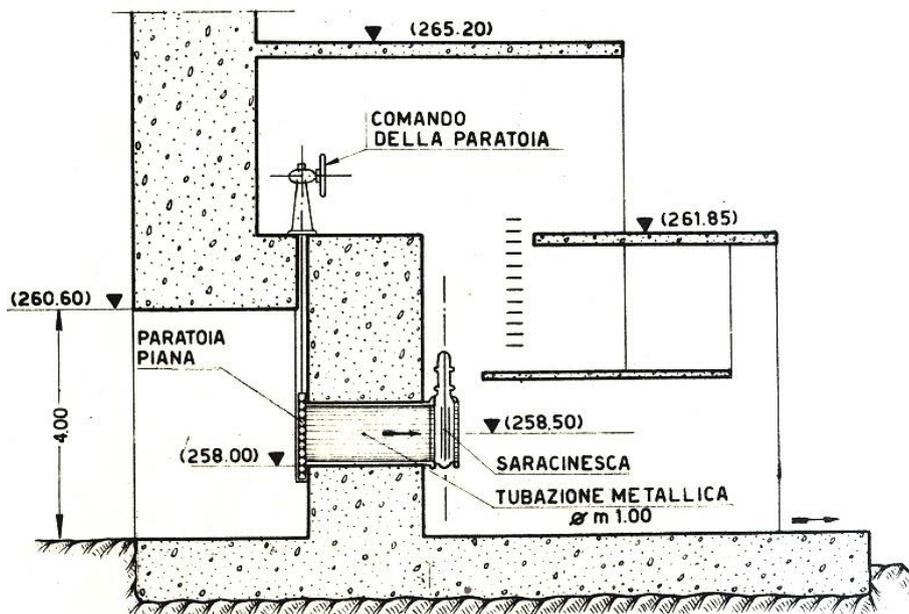


Figura 8 – Sezione longitudinale scarico di fondo

In Figura 9 si può invece vedere la restituzione dello scarico di fondo e il locale superiore contenente i comandi in sito della paratoia.



Figura 9 – Restituzione e locale superiore scarico di fondo

In Figura 10 si riporta la scala delle portate dello scarico di fondo, determinata dagli studi di "Rivalutazione della sicurezza idraulica" del 2006.

SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO DI FONDO

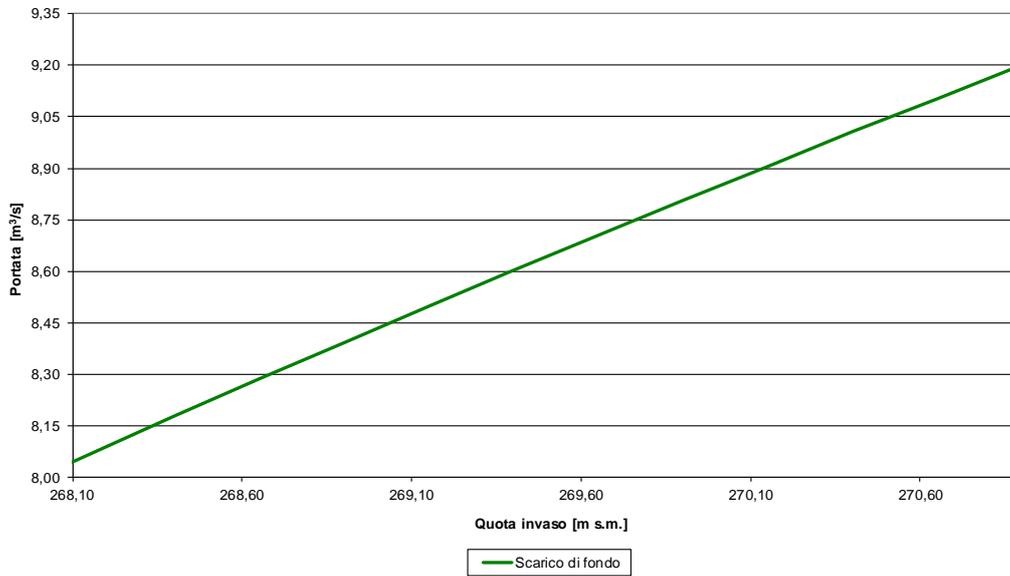


Figura 10 – Scala delle portate dello scarico di fondo

2.4. CAPACITÀ ATTUALE DELLE OPERE DI SCARICO

In concomitanza dell'attuale quota di massimo invaso (270,70 m s.m.) risultano le capacità degli organi di scarico di Tabella 1.

Scarico	Portata [m³/s]
Scarico di superficie	147,9
Scarico di mezzofondo	15,7
Scarico di fondo	9,1
	172,7

Tabella 1 – Capacità attuale degli scarichi a 270,70 m s.m.

3. SCARICO DI SUPERFICIE NELLA CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

In progetto è previsto l'incremento della capacità di scarico dello scarico di superficie mediante la demolizione della passerella attuale e delle sue pile, unitamente all'abbassamento di 1,15 m della parte sinistra della soglia dello scarico di superficie, portandola da 269,85 m s.m. a 268,70 m s.m., e della parte in destra di 8 cm, da 269,88 m s.m. a 269,80 m s.m.

Così facendo si incrementa la luce sfiorante in corpo diga; inoltre l'eliminazione delle pile favorisce lo sfioro eliminando qualsiasi rischio di ostruzione da parte di corpi galleggianti.

In sostituzione della passerella attuale ne verrà messa in opera una nuova metallica ad una sola luce, con estradosso a 272,37 m s.m., poggiante su spalle in calcestruzzo armato anch'esse a 272,37 m s.m., che risulta quindi essere la nuova quota di coronamento della diga.

In Figura 11 si riporta una vista schematica da valle della nuova configurazione dello scarico di superficie, con evidenziate in azzurro le aree considerate come efficaci nei confronti dello scarico della portata.

A favore di sicurezza le lunghezze efficaci considerate per i tratti laterali di sfioro sono state ridotte (circa 7%) rispetto a quelle effettive, inoltre non sono stati considerati i gradoni laterali presenti in corrispondenza di entrambe le imposte (aree in bianco in Figura 11).

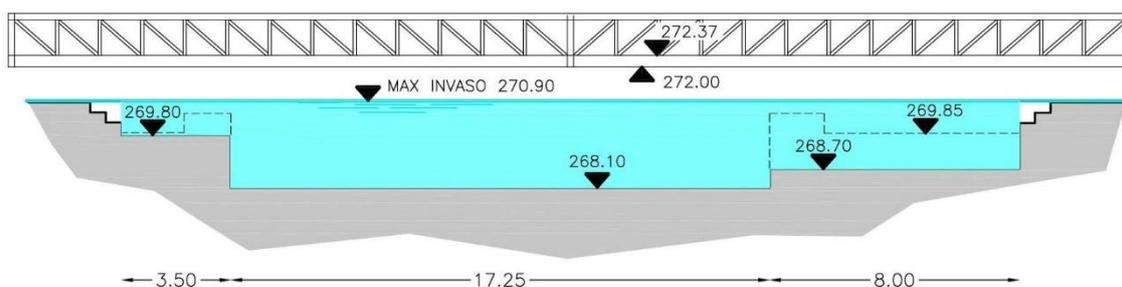


Figura 11 – Vista da valle sfioratore (stato di progetto)

In Figura 11 è riportata la nuova quota di massimo invaso del serbatoio, risultante dai calcoli esposti nel seguito: 270,90 m s.m.

Le soglie laterali di sfioro hanno pertanto un massimo carico idrico di 2,20 m in sinistra e 1,10 m in destra. In progetto è previsto che esse vengano sagomate secondo un profilo WES (U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station) disegnato, per aumentare l'efficienza dello sfioro, per un carico inferiore del 30%: 1,70 m in sinistra e 0,85 m in destra.

Per determinare il coefficiente di efflusso di queste soglie si è fatto riferimento al grafico di Figura 12, che riporta la variazione del coefficiente in funzione del rapporto h_f/h_p dove h_f è il battente idrico sulla soglia mentre h_p quello per cui la soglia è stata progettata (C.V. Davis, K.E. Sorensen – “Handbook of applied hydraulics”).

Nel nostro caso $h_f/h_p = 1,3$.

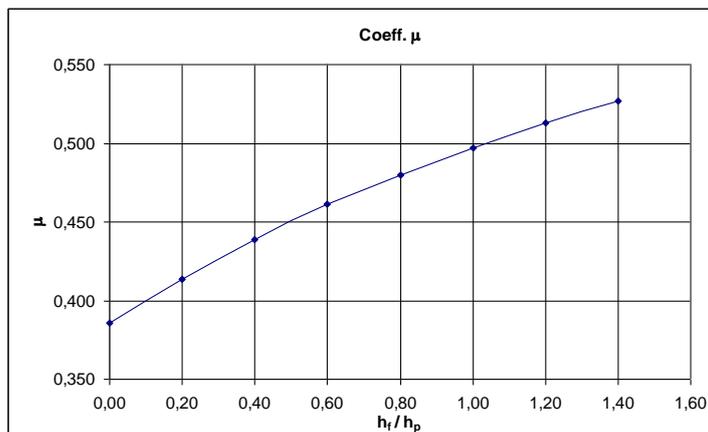


Figura 12

Si otterrebbe quindi un coefficiente di efflusso di $\mu = 0,52$ ma nei calcoli progettuali di valutazione della capacità di scarico di questo manufatto, cautelativamente, e per tenere conto degli effetti di contrazione e minore alimentazione delle soglie in prossimità delle imposte, è stata applicata una riduzione di oltre il 10%, assumendo lo stesso valore della soglia centrale: 0,455 (v. “Rivalutazione della sicurezza idraulica” del 2006).

Così facendo, con la classica legge dello sfioro:

$$Q = \mu \cdot L \cdot h \cdot \sqrt{2g \cdot h}$$

è stato calcolato il contributo di ciascuna delle tre soglie sfioranti (centrale, sinistra e destra) dello scarico di superficie, ed è stata quindi determinata la scala delle portate di questo scarico nella configurazione di progetto (v. Figura 13).

SCALA DELLE PORTATE DELLO SCARICO DI SUPERFICIE (STATO DI PROGETTO)

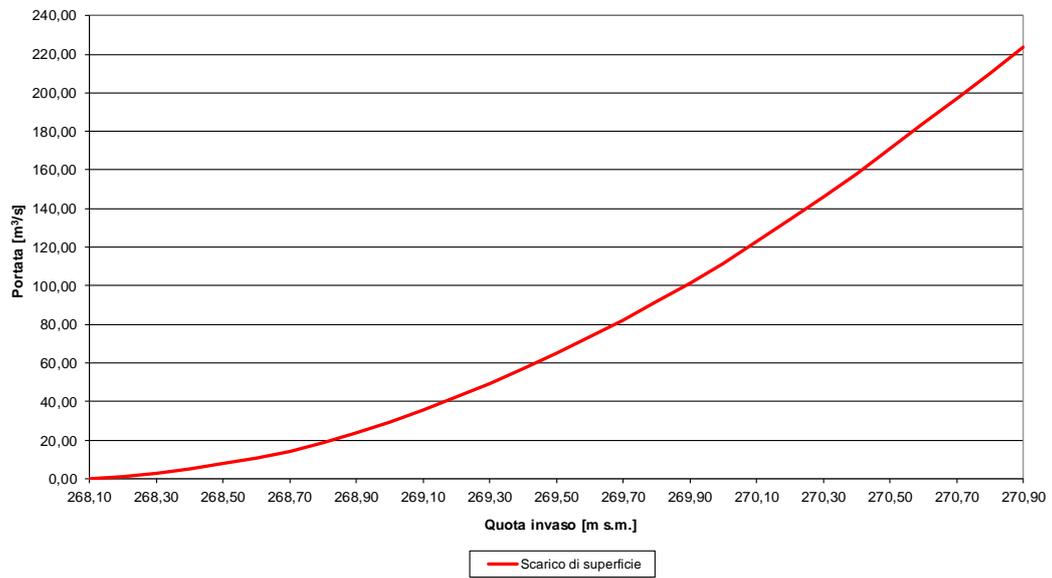


Figura 13 – *Scala delle portate dello scarico di superficie (stato di progetto)*

4. EVACUAZIONE DELL'ONDA DI PIENA DI PROGETTO

Nella configurazione di progetto delle opere si è simulato l'ingresso al serbatoio dell'onda di piena di progetto Tr 500 anni, avente portata al colmo di 248 m³/s, senza considerare a favore di sicurezza la laminazione del serbatoio visto anche il suo modesto contributo.

Per smaltire il picco dell'onda di piena il serbatoio raggiunge quota 270,90, m s.m. che risulta quindi essere la nuova quota di massimo invaso del serbatoio.

In Tabella 2 sono riassunte le portate scaricate in corrispondenza del nuovo livello di massimo invaso (270,90 m s.m.).

Scarico	Portata [m³/s]
Scarico di superficie (parte centrale)	162,9
Scarico di superficie (parte sinistra)	52,6
Scarico di superficie (parte destra)	8,1
<i>Scarico di superficie</i>	223,6
<i>Scarico di mezzofondo</i>	15,8
<i>Scarico di fondo</i>	9,2
	248,6 m³/s

Tabella 2 – Capacità di progetto degli scarichi a 270,90 m s.m.

Come si può constatare risulta alla nuova quota di massimo invaso (270,90 m s.m.) una capacità di scarico sufficiente ad esitare la piena cinquecentenaria (248 m³/s).

5. VERIFICHE DEL FRANCO DA NORMATIVA

Per la determinazione del franco richiesto si fa riferimento al D.M. 26.06.2014 "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione di sbarramenti di ritenuta", in base a cui:

- per dighe in calcestruzzo, il franco netto non deve essere inferiore ad 1 m (§ C.1);
- l'ampiezza della semionda causata dal vento, per un vento con velocità di 100 Km/h¹ ed un fetch di 1 Km, è di 0,27 m (§ C.2);
- l'altezza del run up, sempre per un fetch di 1 Km, è di 0,033 m.

Pertanto è richiesto che il franco, definito come differenza tra la quota del piano di coronamento e quella del massimo invaso, sia almeno di:

$$1 + 0,27 + 0,033 = 1,30 \text{ m.}$$

Dato che la quota di coronamento è 272,37 m s.m., il franco regolamentare è ampiamente rispettato, essendo: 272,37 m s.m. – 270,90 m s.m. = 1,47 m > 1,30 m.

Infine si evidenzia come la configurazione di progetto garantisca migliori condizioni di efflusso dallo scarico di superficie in conformità alla Circolare 3199/UIDR del 06.04.2005; infatti in condizioni di massimo invaso si ha un franco rispetto all'intradosso della passerella a coronamento di 1,10 m (= 272,00 m s.m. – 270,90 m s.m.).

In conformità alla normativa (D.M. 26.06.2014) si è determinato l'evento di piena che determina l'annullamento del franco; si è quindi cercato il tempo di ritorno che determina un livello di invaso pari all'intradosso della nuova passerella a coronamento: 272,00 m s.m.

Con questo livello (272,00 m s.m.) gli scarichi esitano complessivamente 413,7 m³/s, come dettagliato in Tabella 3.

Scarico	Portata [m³/s]
<i>Scarico di superficie</i>	387,4
<i>Scarico di mezzofondo</i>	16,7
<i>Scarico di fondo</i>	9,6
	413,7 m³/s

Tabella 3 – Capacità di progetto degli scarichi a 272,00 m s.m

Si riportano in Tabella 4 le portate al colmo di piena in funzione del tempo di ritorno della Relazione idrologica del Prof. Rosso del 2006.

¹ In assenza di dati, si considera cautelativamente la massima velocità del vento prevista nel D.M. 26.06.2014

Tempo di ritorno [anni]	Portata al colmo [m³/s]
50	155
100	180
200	208
500	248
1000	281

Tabella 4 – Portate al colmo di piena da Relazione Prof. Rosso (2006)

In Figura 14 si riporta la rappresentazione grafica in scala logaritmica di queste portate di piena e la linea di tendenza che le interpola, e che viene estrapolata fino a tempi di ritorno molto superiori.

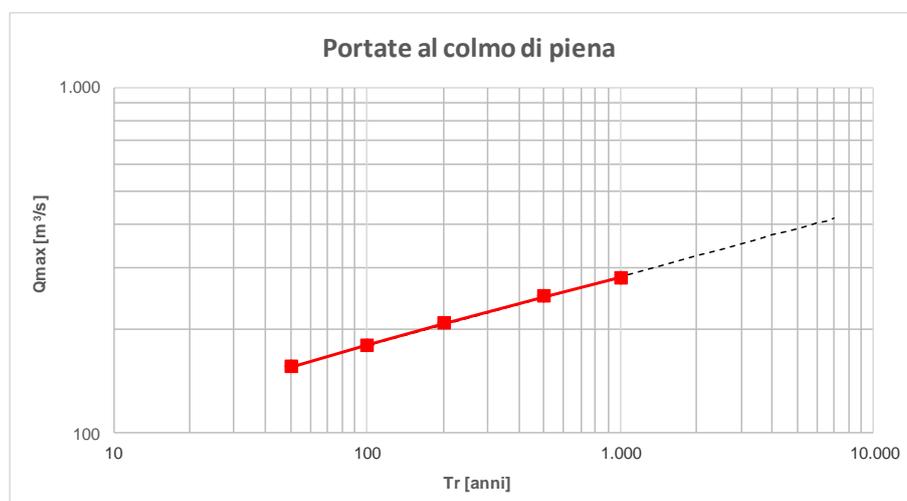


Figura 14 – Portate al colmo di piena in funzione del tempo di ritorno

Come si può vedere dal grafico, la portata di 413,7 m³/s corrisponderebbe ad un evento di piena con addirittura circa 7.000 anni di tempo di ritorno.

6. VERIFICHE DELL'ALVEO DI VALLE

In ottemperanza a quanto richiesto dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Venezia con nota prot. 11498 del 16.05.2018, si riportano qui di seguito le verifiche idrauliche attinenti la casa di guardia (Centrale di Mulinars) e i camminamenti di accesso alla diga.

La Centrale di Mulinars ha il suo piazzale di accesso a quota 244,64 m s.m.; un muro in calcestruzzo lato alveo, alto 60 cm, lo protegge dalle acque del Torrente Cosa fino a livelli idrici di 245,24 m s.m.

Dall'edificio della Centrale si diparte il percorso pedonale che consente di raggiungere mediante scale lo sbarramento; la quota più bassa di questo percorso è in prossimità dell'edificio, ed è a 245,41 m s.m.

Queste quote sono state ottenute dalla campagna di rilievi topografici del 2017, propedeutici alla progettazione degli interventi.

Mediante il software HEC-RAS del US Army Corps of Engineers è stato eseguito un modello in moto permanente dei primi ~900 m di alveo a valle della diga per determinare i livelli idrici in corrispondenza dei percorsi di accesso alla diga e del piazzale della Centrale di Mulinars.

Per costruire questo modello sono state utilizzate le sezioni degli studi di ISMES ed Enel-CRIS di propagazione delle onde di piena a valle della diga, integrando la porzione di alveo in prossimità della Centrale di Mulinars con i rilievi topografici del 2017.

In Figura 15 si può vedere il modello di calcolo dell'alveo.

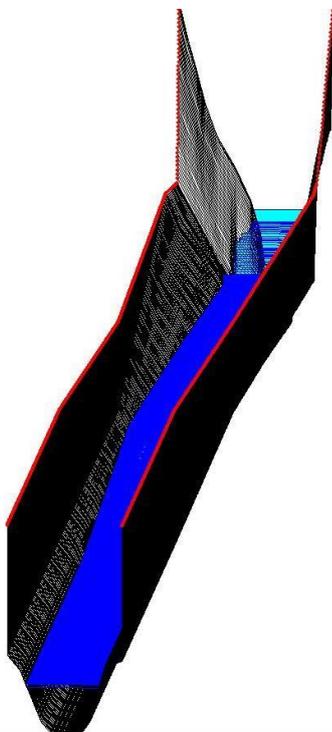


Figura 15 – *Modello di calcolo dell'alveo di valle*

I calcoli sono stati eseguiti oltre che per la portata di progetto Tr 500 anni: 248 m³/s, anche per la Tr 200 anni: 208 m³/s.

Come scabrezza, in conformità alle direttive dell'Autorità di Bacino del Fiume Po (v. *Progetto di Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico – PAI*), la scabrezza di Strickler è assumibile tra 20 e 30 m^{1/3}/s.

Pertanto i calcoli sono stati eseguiti per tre valori di scabrezza: 20, 25 e 30 m^{1/3}/s, nonostante la regolarità e pulizia dell'alveo, visibile in Figura 16, facciano ritenere più credibili valori prossimi a 30 m^{1/3}/s.

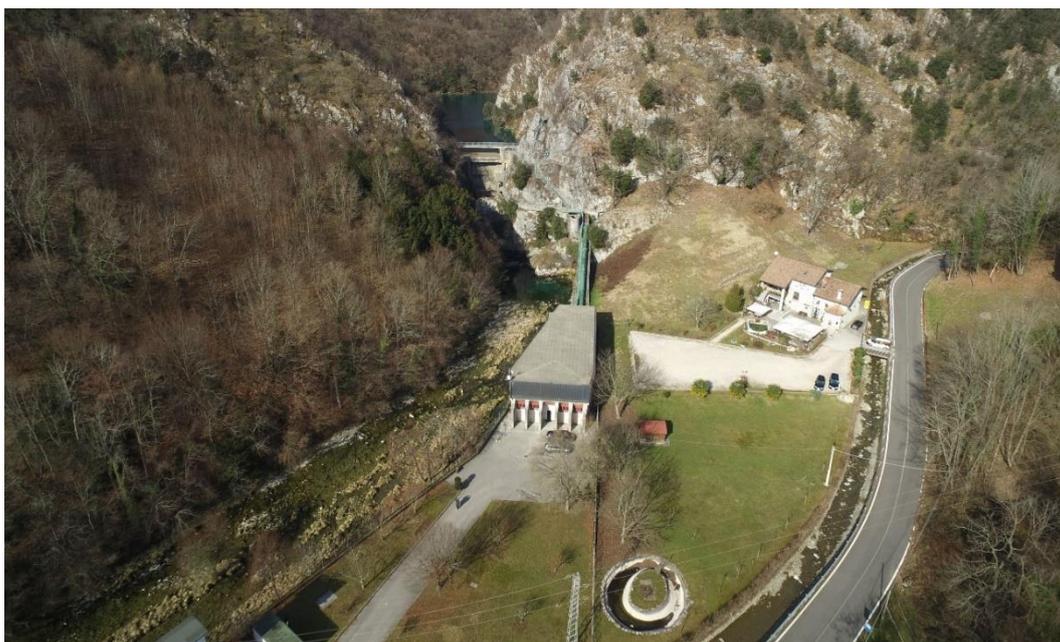


Figura 16 – Vista dell'alveo di valle

Il profilo idraulico tipo che si ottiene per tutti i casi esaminati è quello di Figura 17, dove si può vedere come l'alveo, a debole pendenza, sia sempre in corrente lenta fino in prossimità della Centrale, dove si instaura un risalto con la corrente veloce del primissimo tratto di alveo a forte pendenza.

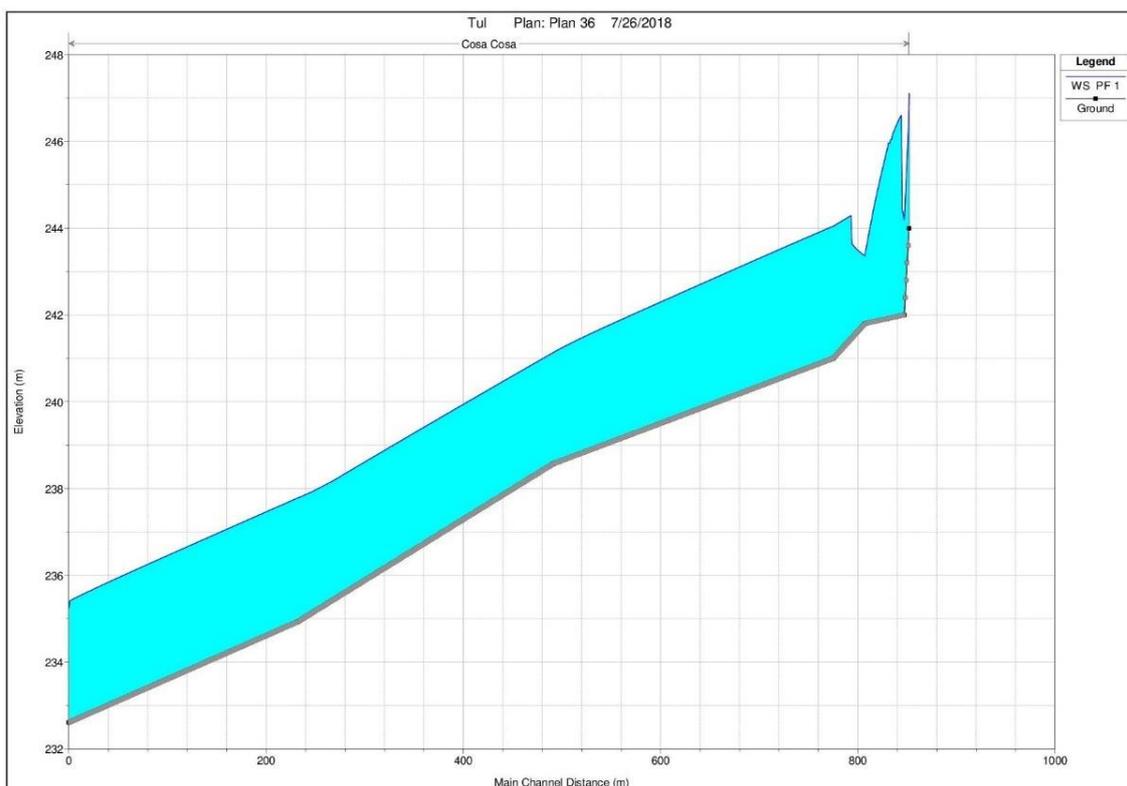


Figura 17 – *Profilo idraulico tipo*

Come anticipato in precedenza, i punti più “bassi” in cui verificare la compatibilità delle altezze idriche sono il tratto iniziale del sentiero di accesso alla diga e il piazzale della Centrale di Mulinars, indicati nella foto aerea di Figura 18.



Figura 18 – *Punti di verifica dei profili idrici*

A favore di sicurezza nelle verifiche sono stati considerati solo i profili di corrente lenta da valle che, non considerando la formazione del primissimo tratto di corrente veloce, determina altezze idriche maggiori in corrispondenza dell'edificio della centrale, come si può vedere dal profilo tipo di Figura 19.

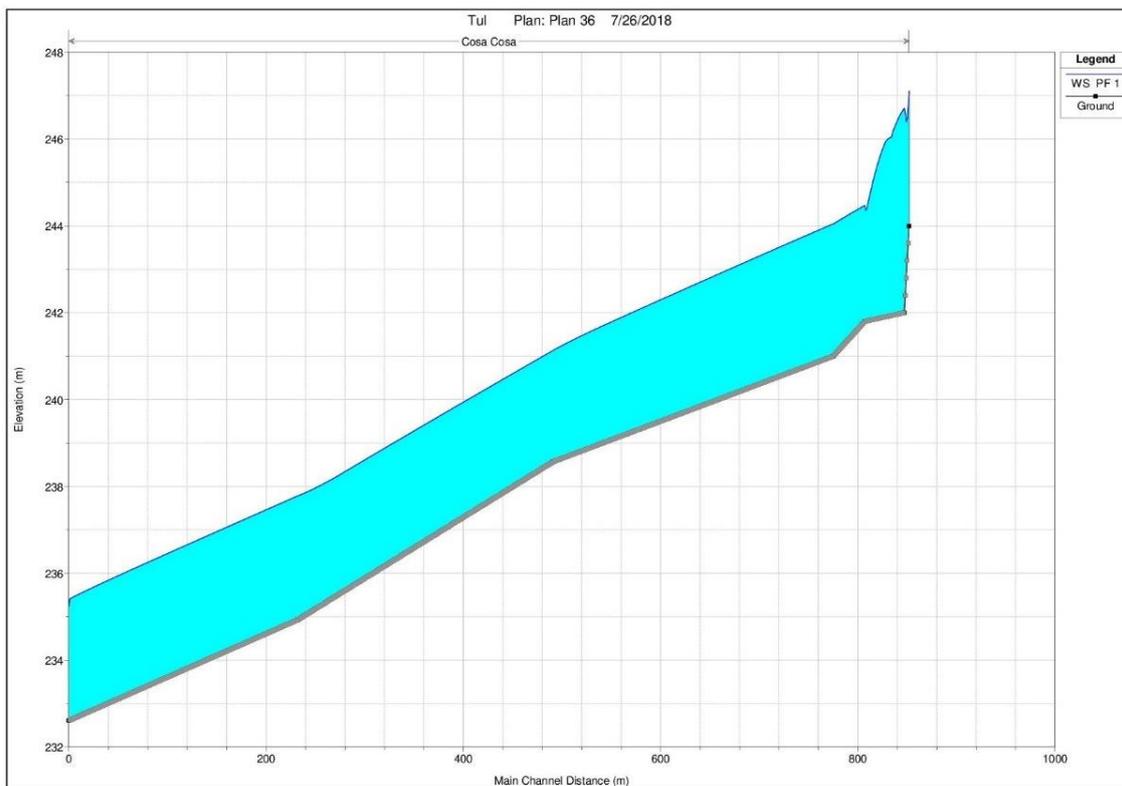


Figura 19 – Profilo idraulico tipo solo di corrente lenta

In Tabella 5 sono riportate le altezze idriche, solo di corrente lenta, nelle sezioni di alveo in corrispondenza dei due punti di verifica di Figura 18.

<u>Sezioni di verifica</u>	<u>Punto più basso sentiero</u>	<u>Piazzale centrale</u>
Progressive (0 diga) [m]	79,00	111,00
Quote opere civili [m s.m.]	245,41	245,24
Quote idriche in alveo [m s.m.]:		
Tr 200 anni (208 m ³ /s), ks 20 m ^{1/3} /s	244,78	244,42
Tr 200 anni (208 m ³ /s), ks 25 m ^{1/3} /s	244,47	244,05
Tr 200 anni (208 m ³ /s), ks 30 m ^{1/3} /s	244,28	243,91
Tr 500 anni (248 m ³ /s), ks 20 m ^{1/3} /s	245,16	244,89
Tr 500 anni (248 m ³ /s), ks 25 m ^{1/3} /s	244,78	244,33
Tr 500 anni (248 m ³ /s), ks 30 m ^{1/3} /s	244,57	244,20

Tabella 5 – Verifiche compatibilità livelli idrici in alveo

Come si può notare in tutti i casi studiati i livelli idrici sono nettamente inferiori alle opere civili; pertanto, considerate anche tutte le cautele adottate nelle verifiche, non si

ritiene necessario alcun intervento di adeguamento del piazzale della Centrale e degli accessi alla diga.

Dott. Ing. Paolo MEDA

Dott. Ing. Carlo Claudio MARCELLO