

Commissione di collaudo ex art. 14 D.P.R. 1363/59
Ing. Luigi A. Ghinami – Ing. Fabrizio Altese – Ing. Luca Farina

**DIGA SUL RIO CUGA, IN COMUNE DI URI (SS)
(N° ARCH. S.N.D. 653)**

**LE OPERE, LA STRUMENTAZIONE, GLI INVASI SPERIMENTALI, GLI STUDI IDROLOGICI,
IL PROBLEMA DEL FRANCO REGOLAMENTARE**

Relazione monografica allegata al verbale della visita in data 5.06.2018
della Commissione di collaudo per i lavori di costruzione della diga

1) CONSISTENZA DELLE OPERE E DEI MANUFATTI DI SCARICO

La diga sul Rio Cuga è uno sbarramento in materiali sciolti, zonato, con nucleo in argilla e limi sabbiosi.

I lavori di costruzione della diga, eseguiti dal precedente concessionario e gestore, il Consorzio di Bonifica della Nurra, si sono articolati in quattro fasi principali:

- lavori di costruzione dello sbarramento originario in pietrame trachitico con paramento in calcestruzzo e delle opere accessorie (6.08.1956 - 21.12.1964);
- lavori di completamento (casa di guardia, opere murarie allo sbocco degli scarichi di superficie e di fondo e dell'opera di presa) e massicci interventi di cementazione, impermeabilizzazione e chiodatura, conseguenti al manifestarsi di dissesti nel paramento di monte, nel cunicolo-taglione e nello sfioratore (6.10.1966 - 10.5.1970);
- lavori di realizzazione di un rilevato di rinfilanco e tenuta a monte dello sbarramento originario, modifica della struttura di coronamento e ulteriori interventi di riparazione, cementazione e impermeabilizzazione conseguenti alle lesioni di assestamento predette (19.05.1971 - 18.12.1974);
- ulteriori lavori di completamento, principalmente riguardanti la sostituzione delle paratoie dello scarico di superficie e del relativo meccanismo di manovra e la realizzazione del canale di scarico di alleggerimento (9.12.1991 - 2.08.1993).

Per effetto delle diverse fasi costruttive succedutesi, la diga si compone sostanzialmente di due parti:

- **La struttura originaria**, realizzata negli anni 1956-64, costituita dal solo semicorpo di valle, in pietrame trachitico di granulometria variabile fra i 100 e i 600 mm vibrocompattato meccanicamente fino a ridurre i vuoti al 29%, con manto di tenuta in calcestruzzo armato con doppia maglia di tondino di ferro di 20 cm di lato $\varnothing 10 \div 14$ mm. Sull'imbasamento per uno spessore variabile intorno a $1,5 \div 2$ m, lungo il paramento a monte per uno spessore variabile da 1,8 m in sommità a 2,80 m alla base, e in cresta per uno spessore di 1 m, il corpo diga originario è formato da una particolare muratura costituita da un'alternanza di strati di pietrame e di calcestruzzo, fatti mutuamente compenetrare mediante vibrazione di quest'ultimo. La muratura retrostante al paramento fu realizzata a conci con giunti in corrispondenza dei giunti del sovrastante paramento in lastroni di calcestruzzo armato.

Il paramento di calcestruzzo armato, ancora esistente, è costituito da lastronature di spessore variabile da 30 cm al coronamento a 50 cm al piede, ed è diviso in elementi di 12 m di larghezza da 18 giunti verticali; l'unico giunto orizzontale è a quota 97,10 m s.l.m.. Per assicurare la tenuta dei giunti, a cavallo di questi furono inseriti dei profilati di gomma sintetica. Nell'ambito degli interventi riparazione e consolidamento delle lesioni da assestamento eseguiti negli anni 1966-70, nella metà superiore del paramento di monte in calcestruzzo furono eseguite chiodature di ancoraggio dei lastroni al sottostante strato di muratura con malta, nella misura di un chiodo $\varnothing 30$ mm per ogni 4 m^2 ; nello stesso periodo, a tergo dei lastroni di calcestruzzo nella metà inferiore fu eseguito l'intasamento con boiaccia, in modo da riempire i vuoti tra i lastroni e la sottostante muratura. La scarpa del paramento di monte originario è mediamente pari a 0,7, con un massimo di 0,75 alla base e un minimo di 0,65 in sommità.

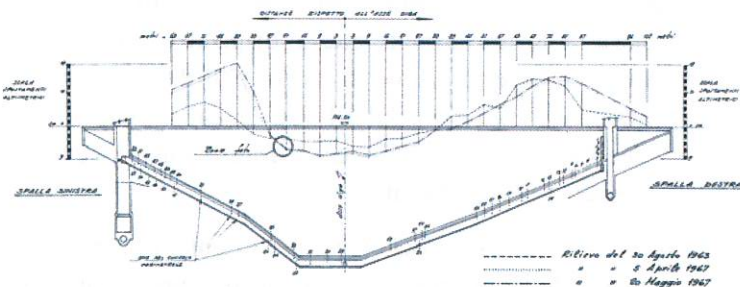
Il paramento di valle è rivestito con bolognini in trachite con giunti stilati a mezzo di malta cementizia poggianti su uno strato di muratura di pietrame a secco assestata a mano; ha pendenza pari ad 1, con banchine larghe 1 m ogni 5 m di altezza.

La lastronatura di monte dello sbarramento originario poggia su uno zoccolo di calcestruzzo entro il quale è stato ricavato un cunicolo perimetrale di ispezione che collega il pozzo delle paratoie dell'opera di presa, in destra della diga, con il pozzo delle paratoie dello scarico di fondo, in sinistra. Al cunicolo perimetrale in passato facevano capo i drenaggi discendenti retrostanti ai giunti dei lastroni del paramento ed i drenaggi del terreno di imposta. Oggi, ad esso fanno capo i drenaggi discendenti che convogliano le permeazioni provenienti dal semicorpo di monte della diga (scogliera + contronucleo + nucleo di argilla), captate dallo strato filtro in conglomerato bituminoso aperto disteso tra il nucleo

argilloso ed il paramento in calcestruzzo del rilevato di valle. I drenaggi profondi, intasati dalle cementazioni, non sono più esistenti. Le perdite raccolte entro il cunicolo longitudinale vengono convogliate a valle da un cunicolo trasversale centrale.

Lo zoccolo di monte si addentra nel terreno per circa 2 m di profondità, e prosegue inferiormente con un taglione dello spessore di 2 m nel tratto in alveo, e di 1,5 m nei tratti lungo le spalle. Il taglione ha profondità variabili da 6 a 12 metri circa, con profondità massime alle quote più basse. Lungo il taglione e per una certa lunghezza entro le spalle, è stato praticato uno schermo di impermeabilizzazione mediante iniezioni di cemento spinte fino alla profondità di 50 metri al di sotto dell'imbasamento. Lo schermo è costituito da due file di iniezioni, la prima delle quali, a fori verticali, giace su un piano posto circa 1,5 m a monte del taglione di piede, e la seconda, a fori inclinati, giace sul piano assiale del taglione.

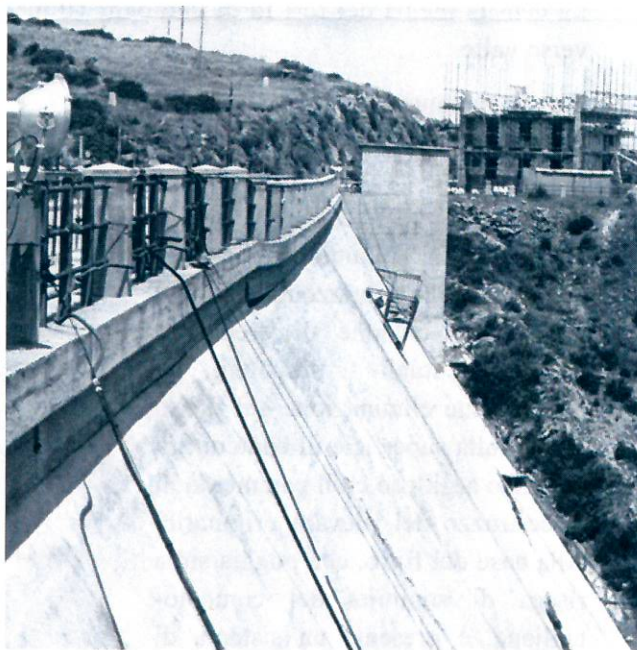
- **Il rinfiango di monte**, realizzato negli anni 1971-74, formato da tre zone, che nel progetto Algranati delle opere di completamento e sistemazione 15.01.1969 vengono indicate con le lettere "A", "B" e "C". La realizzazione del semicorpo di monte fu resa necessaria da consistenti cedimenti dei terreni di imbasamento, ai quali conseguirono gravi dissesti che compromisero la capacità di tenuta dello sbarramento originario. Un'ulteriore rilevante causa di dissesti fu il sollevamento dei terreni delle spalle per effetto delle sottopressioni dovute alle stesse iniezioni di cementazione finalizzate a contrastare gli assestamenti.



Raffronto fra rilievi altimetrici del 1963 e del 1967, indicante un assestamento differenziale fra le spalle e la parte centrale dello sbarramento dell'ordine dei 25÷30 cm in 4 anni

- La zona "A", avente la funzione di nucleo impermeabile, è costituita da limi argillo-sabbiosi provenienti dalle golene del Rio Cuga, in prossimità della strada per Putifigari, a valle della diga. Fu posto in opera per strati orizzontali dello spessore di circa 20 cm costipati con 8 passate di rullo da 15 tonnellate con umidità del 16%, fino a raggiungere valori del peso specifico del terreno secco non inferiore a 1,65 t/m³.

- Le zone "B" e "C", la prima costituente un contronucleo semipermeabile e la seconda un rinfiango permeabile di protezione e appesantimento, sono formate con il tout-venant della stessa cava di roccia trachandesitica utilizzata per la costruzione della struttura originaria, cava che è situata 700 m a monte della diga, in sponda destra. Il tout-venant, tagliato per vagliatura a 100÷150 mm, è stato utilizzato, per la parte passante al vaglio, per realizzare la zona "B", e per la parte trattenuta, con dimensione massima di 600 mm, per realizzare la zona "C". Il materiale della zona "B" è stato posto in opera per strati orizzontali di 30 cm, e costipato con 7-8 passate di rullo vibrante da 12 tonnellate; il materiale della zona "C" (scogliera) è stato posto in opera per strati di 80 cm e rullato con lo stesso rullo vibrante utilizzato per il materiale della zona "B". I materiali delle due zone "B" e "C" sono atti a funzionare come



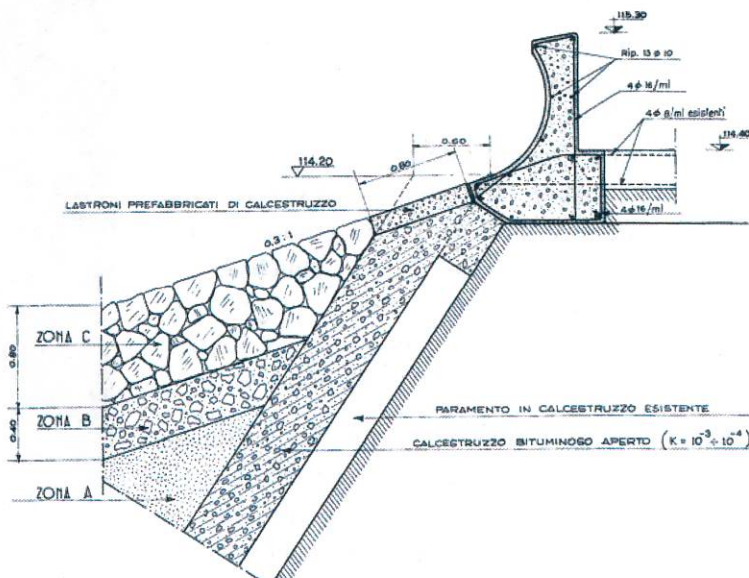
1967 - Movimento altimetrico del coronamento, lato monte

filtri rispettivamente di quelli delle zone "A" e "B". Al fine di aumentare la permeabilità della zona "B" e quindi facilitare, in fase di svaso, l'effiltrazione dell'acqua, nella zona "B" sono stati inseriti strati drenanti orizzontali di sabbia e pietrischetto.

Il rinfianco di monte è realizzato direttamente sul terreno di imposta, previa asportazione del terreno vegetale ed accurata preparazione della superficie. I tre strati costituenti, "A", "B" e "C", terminano in basso con un tratto orizzontale realizzato per ragioni di ordine statico che consigliarono l'appesantimento della parte inferiore del rilevato e lo spostamento verso monte dell'unghia del rilevato stesso. L'entità piuttosto rilevante dello spostamento verso monte dell'unghia del rilevato non consentì di avvalersi, per l'esecuzione dei lavori, dell'allora esistente diga preliminare eretta in occasione della costruzione della struttura originaria. Questa fu quindi demolita, e il nuovo rilevato fu munito di una nuova avandiga in scogliera. All'epoca della costruzione, la nuova avandiga venne dotata di un dispositivo di tenuta costituito in elevazione da lastroni in calcestruzzo armato poggianti su uno zoccolo in calcestruzzo che si addentra nel terreno per circa 4 m di profondità, e in fondazione da uno schermo di pali accostati che, attraversando il detrito di fondo valle, si attestavano sulla sottostante formazione rocciosa. A lavori ultimati, questo dispositivo fu reso inefficiente mediante la demolizione di parte dei lastroni e la rip perforazione di alcuni pali dello schermo, allo scopo di rendere libero il movimento di effiltrazione dell'acqua dal rilevato e dai terreni di fondazione durante la fase di svaso. Fu invece lasciato integro lo zoccolo in calcestruzzo, che funge anche da appoggio per i materiali sciolti costituenti la scogliera più superficiale.

In fase di costruzione del rilevato di monte, preliminarmente alla realizzazione della zona "C", furono realizzate delle iniezioni cementizie di impermeabilizzazione del terreno di fondazione, praticate a partire dal paramento di monte della zona "B". Le iniezioni, che interessarono per 10 m la sottostante formazione rocciosa avente il tetto a quota 60 m s.l.m. circa, furono estese a tutto l'imbasamento del rilevato di monte, e andarono perciò a collegarsi con lo schermo profondo dello sbarramento originario. La densità media dei fori fu di uno ogni 10 m² di superficie, con densità dei fori crescente da monte verso valle.

Fra il paramento di monte della struttura originaria ed il nucleo impermeabile a questo addossato, è interposto uno strato filtro in conglomerato bituminoso aperto, della larghezza in orizzontale di 0,60 m, avente funzione di drenaggio delle eventuali filtrazioni, e conseguente eliminazione del flusso idrico sulla superficie di contatto tra il nucleo argilloso ed il paramento in calcestruzzo del rilevato originario. Alla base del filtro, che poggia sulla risega di sommità del cunicolo-taglione, è presente un sistema di fori di raccolta delle infiltrazioni (un foro del Ø 100 ogni 6 m) per il recapito nel cunicolo delle infiltrazioni stesse. Al fine di impedire che la presenza del filtro drenante favorisse il passaggio di acqua in risalita dai terreni di fondazione a monte fino alla base del filtro stesso lungo la superficie di contatto tra la terra del nucleo e il calcestruzzo del taglione, è stato previsto un dispositivo costituito da una membrana bituminosa in doppio strato altamente deformabile, chiodata e incollata per mezzo di mastice



La conformazione del rinfianco di monte come prevista dal progetto Algranati del 1969 (che contemplava anche un muro paraonde sul coronamento, poi non realizzato)

bituminoso al calcestruzzo del taglione, la quale si sovrappone al filtro drenante per un metro di altezza. La membrana è sigillata al piede per mezzo di un cordolo di calcestruzzo bituminoso chiuso.

Lo **scarico di superficie**, ubicato in sponda sinistra, è costituito da due luci sfioranti, ognuna larga 16 metri, con soglia a quota 108 m s.l.m.. Le luci sono corredate da paratoie a ventola in lega leggera, interamente abbattibili, aventi altezza di ritenuta di 5 m, comandate da pistoni oleodinamici. Le soglie di sfioro immettono in un'opera a imbuto che convoglia le acque in una galleria di eduazione a sezione circolare del diametro di 8 m, della lunghezza di 181,5 m, caratterizzata da una pendenza dell'11%. Questa sbocca a valle in un breve tronco di canale divergente all'aperto entro il quale è ricavata una vasca di dissipazione.

Lo **scarico di fondo**, costituito da una galleria con sezione circolare di diametro interno pari a 3 m che sottopassa la spalla sinistra della diga, è capace di smaltire una portata di circa 77 m³/s con l'invaso alla quota massima di regolazione.

Lo sbarramento è provvisto anche di uno **scarico di alleggerimento**, che si diparte dalla derivazione irrigua. Lo scarico è capace di evacuare una portata di 45 m³/s in corrispondenza della quota massima di regolazione.

Il bacino del Cuga è collegato al serbatoio dell'Alto Temo (Monteleone Roccadoria) da una galleria lunga circa 10 km con soglia iniziale a quota 196 m s.l.m. e, tramite la galleria stessa ed un sistema di canali a cielo aperto, riceve le acque non solo dell'invaso allacciato, ma anche del Rio Sette Ortas, del Rio Badde de Jana e del Rio S'Olia (o Rio Giunchi, affluente in destra del Rio Badde de Jana).

La superficie complessivamente drenata dall'invaso del Cuga ammonta a 245 km², di cui 60 direttamente sottesi dalla diga sul Cuga, 145 sottesi dalla diga dell'Alto Temo e 40 drenati dalle opere minori.

2) STRUMENTAZIONE DI CONTROLLO

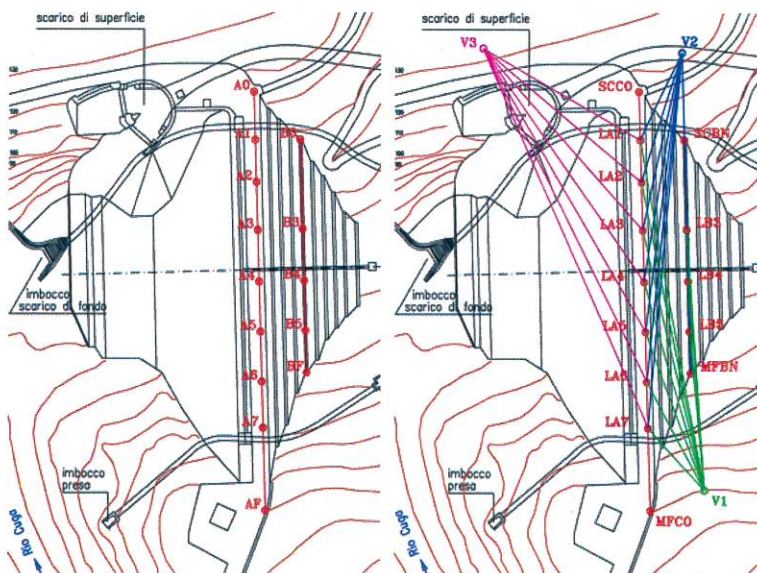
Presso lo sbarramento sono rilevate e raccolte le seguenti misure di controllo:

- **Spostamenti planimetrici** (frequenza mensile):

Gli spostamenti planimetrici in direzione monte-valle sono rilevati mediante collimazione di complessivi 10 punti di misura di cui 7 allineati sul coronamento, e 3 sul gradone del paramento di valle a quota 95 m s.l.m.. Originariamente (e fino al mese di ottobre 2013) la collimazione avveniva secondo il classico schema che prevedeva punti di stazione e mire fisse ubicati su sponde opposte e anch'essi allineati con i punti di misura.

Dal mese di novembre 2013, gli spostamenti dei medesimi 10 punti di misura si rilevano facendo stazione in tre postazioni fisse situate sulle sponde, due in sinistra

(una a monte e una a valle) e una in destra (a valle). La collimazione si esegue mediante una "stazione totale" elettronica e autocollimante, motorizzata e dotata di telecamera per il puntamento automatico, che consente di raggiungere la precisione sulle distanze di 1 mm + 1 ppm e la precisione sugli angoli

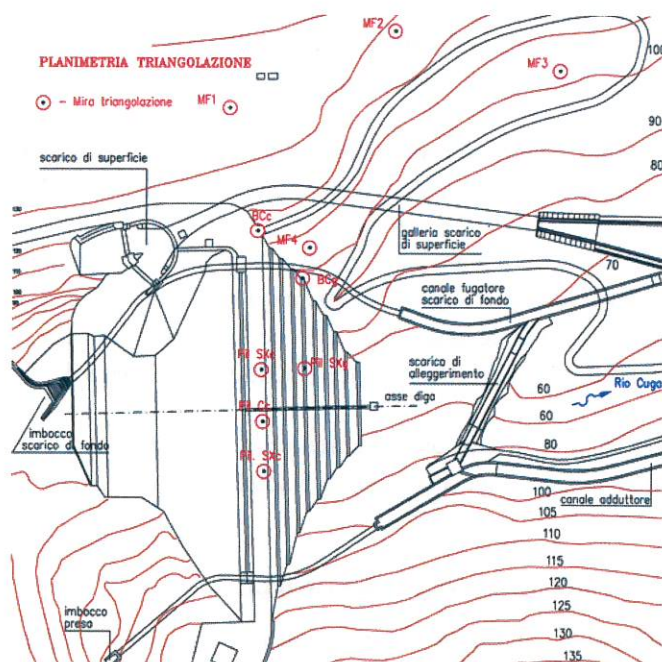


Confronto fra il precedente e l'attuale schema di rilevamento degli spostamenti planimetrici dei 7 + 3 punti di misura

orizzontali e verticali pari a 0,5" sessagesimali. Le misure eseguite, essendo sovrabbondanti, sono poi elaborate con il metodo dei minimi quadrati, ed i risultati (che costituiscono l'entità degli spostamenti cercati) sono restituiti rispetto ad un sistema di assi cartesiani con l'origine posta sulla vecchia base di collimazione del coronamento (A0=SCCO) e l'asse delle ordinate orientato sulla mira fissa (AF=MFCO).

Gli spostamenti in direzione monte-valle e sinistra-destra di ciascuna delle 10 basi di misura, col nuovo schema di rilevamento sono calcolati, in continuità con la serie storica, nel rispetto degli allineamenti precedentemente utilizzati, e cioè A0-MF (SCCO-MFCO) per le 7 mire poste sul coronamento e B0-BF (SCBN-MFBN) per le restanti 3 mire poste sul gradone di valle.

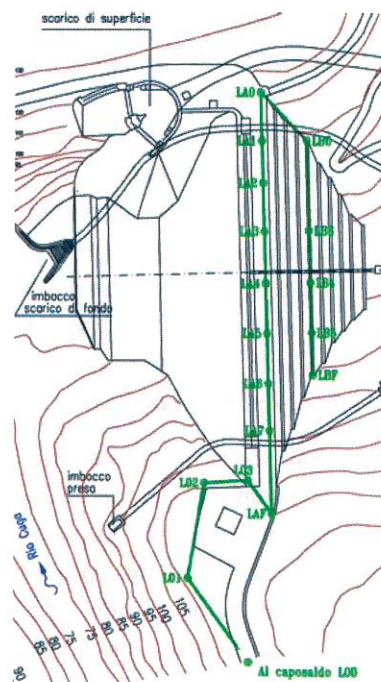
L'utilizzo della stazione totale ed il nuovo schema di rilevamento rende non più necessario il controllo trigonometrico dei caposaldi del sistema di collimazione: essendo le misure sovrabbondanti, l'eventuale spostamento di uno dei tre punti di stazione sarebbe immediatamente rilevato da un incremento nei residui delle osservazioni. Dunque è stata abbandonata la misura (pure prevista con frequenza mensile nel Foglio di condizioni per l'esercizio e la manutenzione) degli spostamenti plano-altimetrici dello sbarramento e dei luoghi circostanti, che prevedeva la misura, a mezzo di distanziometro elettronico, degli spostamenti di sei basi utilizzate per la collimazione rispetto a quattro mire fisse poste su appositi pilastri in sponda sinistra. Il rilievo, con riscontro sulle mire fisse citate, riguardava due basi di collimazione, poste in sponda sinistra nel coronamento e nel gradone di valle, i tre pilastri centrali del coronamento e il pilastro in sinistra del gradone di valle.



Schema del controllo trigonometrico dei caposaldi di collimazione, oggi abbandonato

- **Spostamenti altimetrici** (frequenza mensile):

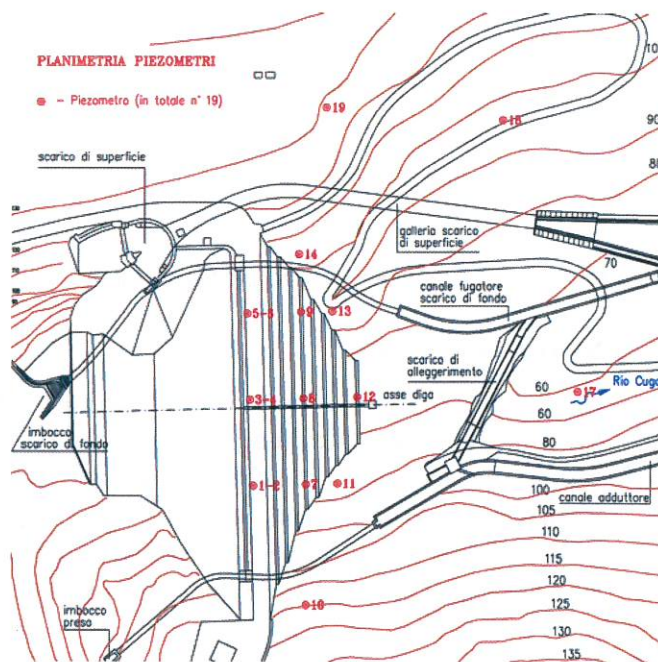
Sono rilevati mediante livellazione geometrica a quota coronamento e sul gradone del paramento di valle a quota 95 m s.l.m.. I punti di misura sono in numero di 12 sul coronamento e di 5 sul gradone del paramento di valle. Dal 2011 la linea è stata integrata con l'introduzione di 4 nuovi caposaldi (due per il coronamento e due per il gradone di valle, non indicati in figura) posti sulle due sponde ad una distanza tale da poter escludere l'influenza del rilevato sulla loro stabilità. La presenza di due punti stabili per ciascuna delle due quote della linea di livellazione consente la compensazione rigorosa delle misure.



Planimetria dei 12 + 5 punti di misura della livellazione

- **Livelli piezometrici** (frequenza mensile):

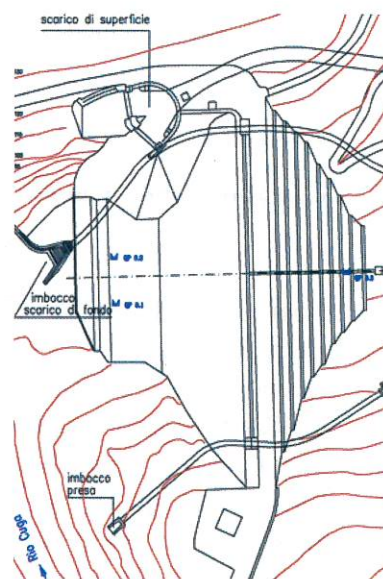
Sono rilevati entro 19 piezometri verticali, di cui 6 sul coronamento, 3 sul gradone a quota 95 m s.l.m. e 10 sulle spalle e a valle della diga. La misura dei livelli si esegue manualmente, mediante sonda freaticometrica elettroacustica collegata ad un nastro metrico graduato. I 6 piezometri ubicati sul coronamento sono costituiti da tre coppie di canne: 1-2, 3-4 e 5-6. In ciascuna coppia, una delle canne (rispettivamente 1, 3 e 5) rileva il livello piezometrico al di sopra del piastrone di base del rilevato (lo strato di muratura costituita da un'alternanza di strati di pietrame e di calcestruzzo), e l'altra al di sopra di quest'ultimo.



Planimetria dei 19 piezometri

- **Perdite** (frequenza settimanale):

Le permeazioni provenienti dal semicorpo di monte della diga (scogliera + nucleo di argilla) e captate dallo strato filtro in conglomerato bituminoso aperto disteso tra il nucleo argilloso ed il paramento in calcestruzzo del rilevato di valle, vengono convogliate da dei tubi di drenaggio discendenti al cielo del cunicolo longitudinale, e si raccolgono nella canaletta che corre lungo il piede di monte del cunicolo. La canaletta convoglia le perdite a due vasche di misura, in una delle quali si raccolgono le acque provenienti dalla parte destra della diga e nell'altra quelle provenienti dalla parte sinistra. Ciascuna delle vasche è dotata di stramazzo triangolare e misuratore automatico a galleggiante del livello. Tuttavia, a causa del fuori servizio dei trasduttori di livello (e della ridotta entità delle perdite) la misura viene in realtà eseguita manualmente, con recipiente tarato e cronometro. Le acque che fuoriescono dalle due vasche di misura vengono poi convogliate ad un'unica canaletta di scarico che le conduce a valle attraverso il cunicolo trasversale. Nel percorso verso valle, la canaletta raccoglie anche eventuali permeazioni attraverso le pareti o i giunti del cunicolo trasversale. All'estremità di valle della canaletta di scarico è collocata una terza vasca del tutto analoga alle precedenti, ove si misurano le perdite totali.



Planimetria dei 3 punti di misura delle perdite

- **Misure giornaliere:**

Sono giornalmente raccolti i seguenti dati:

- temperatura massima e minima dell'aria (con termometro ubicato nella stazione meteorologica sita in prossimità della casa di guardia e collegato al sistema di monitoraggio);
- altezza di precipitazione (con pluviografo ubicato come sopra);
- quota del livello di invaso (è installato un teleidrometro sulla passerella che conduce al torrino di presa, con rimando del segnale della quota d'invaso in casa di guardia; è stata montata anche una stadia idrometrica su un pilastro della passerella d'accesso al torrino di presa);

- temperatura dell'acqua in superficie (con termometro immerso);
- temperatura dell'acqua a 5 metri di profondità (con termometro immerso);
- vengono altresì rilevate le grandezze legate agli eventi meteorologici ed idrologici (piene) di particolare importanza.

3) POTENZIALITÀ DEGLI SCARICHI PRINCIPALI

3.1) Scarico di superficie

Lo studio su modello dello sfioratore, condotto nel 1961 dal Prof. Costantino Fassò presso l'Istituto di Idraulica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, ai fini della valutazione delle portate scaricate indagò solo la condizione di paratoie entrambe totalmente abbattute. Non fu quindi esaminato il funzionamento dell'imbocco con una paratoia aperta e una chiusa, né quello con paratoie parzialmente sollevate. Nell'ipotesi di paratoie entrambe totalmente aperte, si ottenne che la portata complessiva scaricata dalle due luci dello sfioratore è esprimibile con la consueta relazione:

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

nella quale:

- Q è la portata in m^3/s ;
- h è il carico in metri misurato al di sopra della quota 108 m s.l.m.;
- $L = 32$ m è la larghezza complessiva delle due luci;
- μ è il coefficiente di efflusso, il cui valore dedotto dalle prove è pari a 0,416.

Ciò, a conti fatti, consente di porre semplicemente:

$$Q = 59 h^{3/2}$$

Come sopra riferito, lo studio su modello del 1961 non esaminò il funzionamento dell'imbocco con paratoie parzialmente sollevate. Lo studio di *Verifica idraulica della diga Cuga a Nuraghe Attentu*, redatto nel giugno 2016 dal Dipartimento di Ingegneria Civile-Ambientale e Architettura (DICAAR) dell'Università di Cagliari, ha tuttavia ritenuto utilizzabile la relazione predetta anche nell'ipotesi di sfioro sopra le paratoie parzialmente o completamente sollevate, quando si indichi con h non più il carico sopra quota 108 m s.l.m., ma il carico sopra il filo superiore delle paratoie. In caso di funzionamento di una sola paratoia, la larghezza L delle luci veniva dimezzata, e con essa il coefficiente moltiplicativo di $h^{3/2}$.

3.2) Scarico di fondo

La portata esitata dallo scarico di fondo della diga deriva dall'equazione nella quale il dislivello tra la quota di monte H (m s.l.m.) e la quota media della sezione di sbocco in corrispondenza delle paratoie, $H_s = 69,45 + h_p/2$ m s.l.m. (essendo h_p l'altezza di apertura delle paratoie), si pone uguale alla somma:

- della perdita di carico all'imbocco della galleria: $\Delta H_i = \frac{K_i V^2}{2g} = \frac{K_i Q^2}{2g A^2}$, dove:

- K_i è il coefficiente di perdita d'imbocco che, trattandosi di imbocco arrotondato e ben raccordato, può porsi pari a 0,1;
- V è la velocità dell'acqua in galleria (m/s);
- g è l'accelerazione di gravità, $9,81$ m/s²;
- Q è la portata uscente (m^3/s);

- A è la sezione della galleria, avente diametro 3 m, dunque $A = \frac{\pi D^2}{4} = 7,069 \text{ m}^2$;

Risulta dunque $\Delta H_i = \frac{0,1 Q^2}{2 * 9,81 * 7,069^2} = 1,020 * 10^{-4} Q^2$

- della perdita di carico continua in galleria: $\Delta H_c = \frac{L n^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{L n^2 Q^2}{R^{4/3} A^2}$, dove:

- L è la lunghezza della galleria dall'imbocco allo sbocco dalle paratoie, 162 m;
- n è il coefficiente di scabrezza di Manning, che nella fattispecie può assumersi pari a $1/80 = 0,0125 \text{ s/m}^{1/3}$;
- R è il raggio idraulico, pari a $D/4 = 0,75 \text{ m}$;

Risulta dunque $\Delta H_c = \frac{162 * 0,0125^2 Q^2}{0,75^{4/3} 7,069^2} = 7,434 * 10^{-4} Q^2$

- della perdita di sbocco: $\Delta H_s = \frac{V_c^2}{2g} = \frac{Q^2}{2g (C_c A_p)^2}$, dove:

- V_c è la velocità dell'acqua nella sezione contratta a valle delle paratoie, pari a $V \frac{A}{A_c} = V \frac{A}{C_c A_p} = \frac{Q}{C_c A_p}$, essendo A la sezione della galleria, A_c la sezione contratta, $A_p = l_p h_p$ la sezione libera delle paratoie, con $l_p = 1,50 \text{ m}$ (larghezza delle paratoie) ed h_p altezza di apertura, variabile fra 0 e $h_{pmax} = 2 \text{ m}$;
- C_c è il coefficiente di contrazione, tabellato in funzione del grado di apertura relativo della paratoia di valle h_p/h_{pmax} (Von Mises, 1946):

h_p/h_{pmax}	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
C_c	0,611	0,612	0,616	0,622	0,631	0,644	0,662	0,687	0,722	0,787	0,95

La distribuzione dei valori di C_c in funzione di $x = h_p/h_{pmax}$ è ben approssimata dalla polinomiale

$$C_c = 9,9206 x^7 - 27,2631 x^6 + 29,3587 x^5 - 15,4219 x^4 + 4,1115 x^3 - 0,3884 x^2 + 0,0216 x + 0,611$$

Risulta dunque $\Delta H_s = \frac{Q^2}{2 * 9,81 (C_c * 1,5 h_p)^2} = 0,0227 \frac{Q^2}{(C_c h_p)^2}$

Avendosi, infine,

$$H - H_s = H - (69,45 + h_p/2) = \Delta H_i + \Delta H_c + \Delta H_s =$$

$$= 1,020 * 10^{-4} Q^2 + 7,434 * 10^{-4} Q^2 + 0,0227 \frac{Q^2}{(C_c h_p)^2}$$

risulta

$$Q = \sqrt{\frac{H - (69,45 + h_p/2)}{8,454 * 10^{-4} + \frac{0,0227}{(C_c h_p)^2}}}$$

Dunque, considerato che $h_{pmax} = 2 \text{ m}$, per ogni valore del grado di apertura delle paratoie $x = h_p/h_{pmax} = h_p/2$, con $0 < x \leq 1$, risultano determinati $h_p = 2x$, C_c (dato dalla polinomiale in x sopra indicata) e dunque la portata Q.

Per $x = 1$, avendosi $h_p = 2 \text{ m}$ e $C_c = 0,95$, per $H = 113 \text{ m s.l.m.}$ risulta $Q = 77,23 \text{ m}^3/\text{s}$; per $H = 113,5 \text{ m s.l.m.}$ risulta $Q = 77,68 \text{ m}^3/\text{s}$.

Si osserva che questi valori correggono in aumento quelli calcolati dal precedente Gestore, Consorzio di Bonifica della Nurra, principalmente per il fatto che nei calcoli del Consorzio il coefficiente di contrazione C_c veniva assunto costante e pari a 0,7. In caso di apertura totale, assumendo $C_c = 0,7$ anziché $C_c = 0,95$, per $H = 113$ m s.l.m. risulterebbe $Q = 58,51$ m³/s, mentre per $H = 113,5$ m s.l.m. risulterebbe $Q = 58,86$ m³/s.

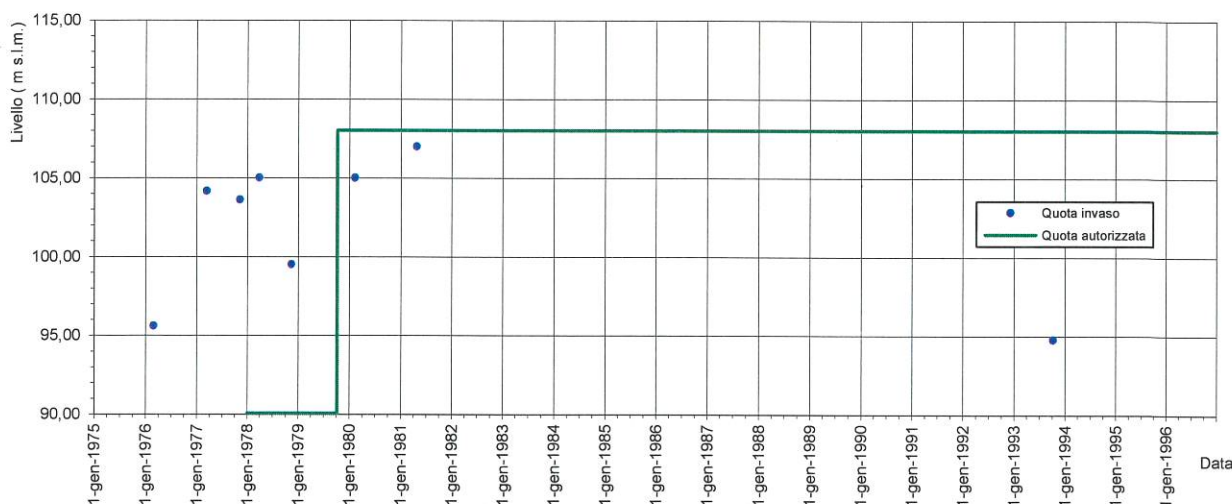
4) INVASI SPERIMENTALI, AUTORIZZAZIONI ALL'INVASO, MASSIME QUOTE SPERIMENTATE

Con riserva di ulteriori ricerche d'archivio, risulta che gli invasi sperimentali della diga del Cuga ebbero inizio il 19.04.1975. Le quote dell'invaso negli anni 1975-1996 non furono rilevate con sistematicità, e allo stato sono note solo quelle misurate in occasione dei rilievi geodetici compiuti negli anni 1975-1981 e in occasione della prima lettura di collimazione nel 1993:

Rilievo	Data	Quota vaso (m s.l.m.)
1 ^a levata geodetica	7-23 aprile 1975	vuoto
2 ^a levata geodetica	26 febbraio - 8 marzo 1976	95,60
3 ^a levata geodetica	18-26 ottobre 1976	98,00
4 ^a levata geodetica	14-19 marzo 1977	104,15
5 ^a levata geodetica	8-12 novembre 1977	103,60
6 ^a levata geodetica	27 marzo - 1° aprile 1978	105,00
7 ^a levata geodetica	13-17 novembre 1978	99,50
8 ^a levata geodetica	6-10 febbraio 1980	105,00
9 ^a levata geodetica	21-25 aprile 1981	107,00
10 ^a levata geodetica	5-10 novembre 1981	vuoto
1 ^a lettura collimazione	8 ottobre 1993	94,77

Per quanto attiene alla quota autorizzata, si ha notizia che questa fosse di 90 m s.l.m. già nel 1978, e che sia stata portata a 108 m s.l.m. dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, IV Sezione, con nota n. 1613 in data 7.09.1979.

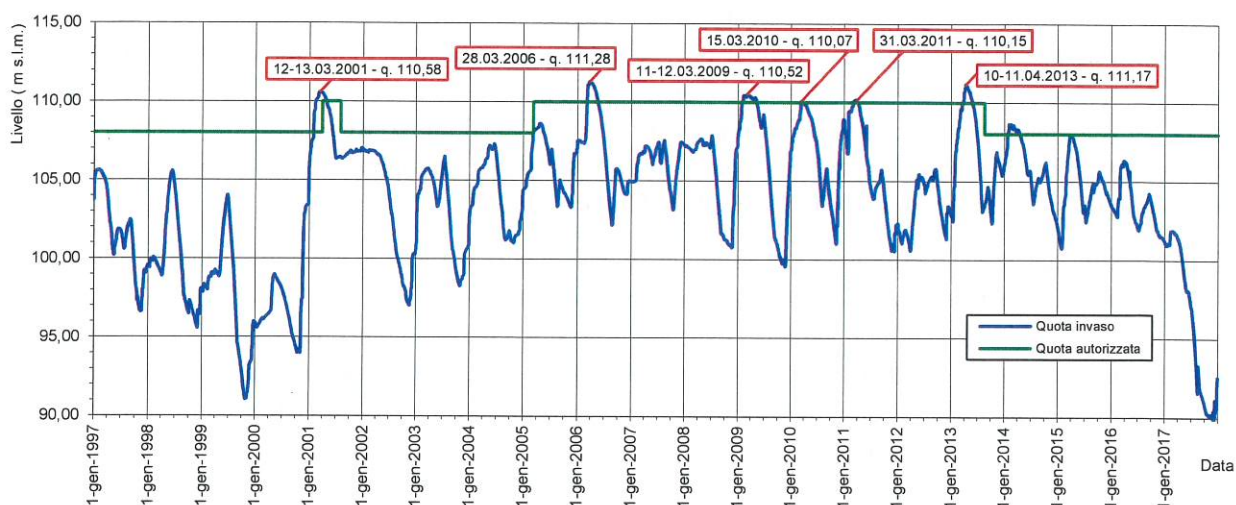
Diga sul rio Cuga - Livelli di vaso anni 1975-1996



A partire dal 1° gennaio 1997 le quote di vaso sono state sistematicamente rilevate, e ne sono disponibili le diagrammazioni. La quota autorizzata è stata portata da 108 a 110 m s.l.m. in due occasioni: la prima quando, con nota del S.N.D., U.P. di Cagliari, n. 644 del 29.03.2001, fu autorizzata provvisoriamente (fino al 31.07.2001) la quota 110 m s.l.m. per consentire al Concessionario l'accumulo temporaneo, fino alla stagione irrigua, dei volumi d'acqua allora in arrivo al serbatoio del Cuga; la seconda, ancora a titolo provvisorio, con nota del R.I.D., U.P. di Cagliari, n. RID/286/UPCA del 8.03.2005, che fissò nel contempo a

112 m s.l.m. la quota temporaneamente raggiungibile in occasione di eventi di piena eccezionali. La quota autorizzata fu infine riportata a 108 m s.l.m. con nota della D.G. Dighe, U.T.D. di Cagliari, n. 10551 del 2.08.2013.

Diga sul rio Cuga - Livelli di invaso anni 1997-2017



La quota massima storicamente raggiunta nell'invaso risulta essere 111,28 m s.l.m., registrata in data 28.03.2006.

Dal 1° gennaio 1997 (da quando cioè sono disponibili le registrazioni giornaliere delle quote di invaso) fino al 31 dicembre 2017, il livello nel bacino risulta aver raggiunto o superato la quota 108 m s.l.m. per complessivi 1012 giorni, la quota 110 m s.l.m. per complessivi 357 giorni, e la quota 111 m s.l.m. per complessivi 56 giorni.

5) IL PROBLEMA DELL'INSUFFICIENZA DEL FRANCO

Tra le diverse problematiche che la diga del Cuga ha posto fin dalla sua realizzazione, permane tutt'oggi irrisolta quella dell'esiguità del franco netto, questione che ha contribuito a dilatare i tempi del collaudo tecnico-funzionale delle opere ai sensi dell'art. 14 del D.P.R. 1° novembre 1959, n. 1363. Il Foglio di condizioni per l'esercizio e la manutenzione indica in 0,40 m il valore del franco netto, a fronte dei 3,5 m che sarebbero stati richiesti dal D.M. LL.PP. 24 marzo 1982 in vigore al momento della compilazione del F.C.E.M..

Il progetto originale della diga, datato 12 settembre 1955, ebbe il parere favorevole della IV Sezione del Consiglio dei Lavori Pubblici in data 18 novembre 1955, in vigore, quindi, del Regolamento di cui al R.D. 1° ottobre 1931, n. 1370. Questo, in merito alle dighe in muratura a secco, prevedeva: *"Il franco del coronamento, da stabilirsi sopra la massima ritenuta possibile, sarà tale da contenere la massima semi-altezza d'onda che può aversi nel lago con margine di sicurezza di almeno un metro"*.

Il progetto 12 settembre 1955 contemplava uno scarico di superficie in corpo diga con soglia a quota 107 m s.l.m. e altezza di ritenuta delle paratoie pari a 5 metri. Uno sfioratore siffatto, dal punto di vista del franco risultava pienamente rispondente al Regolamento allora in vigore. Ciò in quanto:

- la massima semi-ampiezza d'onda era valutata in 0,5 m,
- il livello di "massima ritenuta possibile", se identificato con la quota massima di regolazione risultava pari a 112 m s.l.m.; se identificato con la quota di massimo invaso risultava di 112,5 m s.l.m.,
- la quota originaria del coronamento della diga era di 114,5 m s.l.m. (oggi scesa a 114,4 m s.l.m. a seguito degli assestamenti intervenuti).

Il franco netto risultava quindi pari a $114,5 - 112,5 - 0,5 = 1,5$ m identificando il livello di massima ritenuta possibile con la quota di massimo invaso, e pari a $114,5 - 112 - 0,5 = 2$ m identificando il livello di massima ritenuta possibile con la quota massima di regolazione.

Il progetto di variante del 14 luglio 1959, che prevede lo spostamento fuori corpo diga dello scarico di superficie, contemplò anche l'innalzamento della soglia da quota 107 a quota 108 m s.l.m., e corrispondentemente l'innalzamento da quota 112,5 a quota 113,5 m s.l.m. della quota di massimo invaso. Il progetto fu approvato dal Servizio Nazionale Dighe con nota n. 3048 del 31 ottobre 1959, quindi ancora in vigenza del Regolamento di cui al R.D. 1° ottobre 1931, n. 1370 (il nuovo Regolamento, di cui al D.P.R. 1° novembre 1959, n. 1363, sarebbe stato emanato il giorno successivo all'approvazione del progetto, e sarebbe poi stato pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale in data 24 marzo 1960).

Al Regolamento del 1931 lo sfioratore era rispondente anche nella nuova versione, ma solo intendendo come quota di "massima ritenuta possibile" la quota massima di regolazione (113 m s.l.m.). Viceversa, secondo il Regolamento del 1959 la diga non sarebbe stata più a norma. Questo, infatti, prescriveva (art. 41) che per tutte le dighe in materiali sciolti il franco rispetto al livello di massimo invaso non dovesse essere inferiore "all'altezza della semionda presumibile nel lago aumentata di m 1,5". Nel caso in esame si aveva invece $114,5 - 113,5 = 1$ m < $(0,5 + 1,5)$ m.

Il progetto 15 gennaio 1969 delle opere di completamento e sistemazione dello sbarramento, a firma dell'Ing. Samuele Paolo Algranati, affrontò anche il problema dell'insufficienza del franco e prevede la disposizione, lungo il lato di monte del coronamento, di un muro paraonde con quota di sommità di 115,30 m s.l.m.. E' da notare, nella verifica del franco effettuata dall'Ing. Algranati, che l'altezza della lama sfiorante corrispondente alla portata di massima piena viene valutata in 5 metri (anziché in circa 5,5 metri, come risulta dallo studio su modello dello scarico di superficie della diga ⁽¹⁾). Il livello di massimo invaso assunto nel calcolo diventa quindi 113,00 m s.l.m. (coincidente con la quota massima di regolazione), e non 113,50 m s.l.m.

Non risulta, sulla base della documentazione esaminata, che la IV Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP., nel voto n. 2090/69 con il quale approvò, sia pure con alcuni suggerimenti, il progetto 15 gennaio 1969, abbia mosso dei rilievi sull'opportunità di realizzare il muro paraonde: di rilievi in tal senso, infatti, non fa menzione la relazione del progetto delle varianti 24 agosto 1970, né la relazione allegata al certificato di collaudo tecnico-amministrativo, che pure indica i diversi suggerimenti previsti nel voto della IV Sezione. Cionondimeno, per motivi che ad oggi gli scriventi non sono in grado di chiarire, il muro paraonde non venne realizzato.

Il D. Min. LL.PP. 24 marzo 1982 e, da ultimo, le nuove Norme tecniche sulle dighe di cui al D. Min. II.TT. 26 giugno 2014 hanno previsto ulteriori aggiornamenti riguardo al calcolo del franco. In base al dettato di queste disposizioni, nelle due ipotesi di presenza o assenza di un muro paraonde, il calcolo del franco e della

⁽¹⁾ Come riferito al paragrafo 3.1), dallo studio su modello dello sfioratore, condotto nel 1961 dal Prof. Costantino Fassò presso l'Istituto di Idraulica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cagliari, risulta che la portata complessiva scaricata dalle due luci dello sfioratore è esprimibile con la classica relazione:

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

nella quale il coefficiente di efflusso μ è pari a 0,416. Con questo assunto, risulta che la portata di progetto di 750 m³/s viene scaricata con un carico di 5,45 m sulla soglia dello sfioratore.

E' possibile che la valutazione dell'Ing. Algranati, secondo la quale il carico corrispondente alla portata di 750 m³/s è di soli 5 m, discenda da una sovrastima del coefficiente di efflusso, quale potrebbe derivare dal supporre che lo scarico si comporti come un normale sfioratore Creager ($\mu \cong 0,485$) non influenzato dalla presenza, a valle, dell'imbuto e della galleria di scarico. Risulta invece dallo studio su modello che la presenza di queste opere a valle dello sfioratore, anche, verosimilmente, per le perdite di carico che vi si determinano, riduce, a parità di carico, la portata scaricata dall'insieme.

massima altezza idrica raggiungibile nel bacino nel rispetto del franco regolamentare risulta dal prospetto seguente.

	altezza diga (m)	A franco netto (m)	fetch (km)	vento (km/h)	B altezza semionda (m)	C run-up (m)	D sisma (m)	E (= A+B+C+D) franco (m)	F quota corona- mento (m s.l.m.)	G (= F-E) max quota raggiun- gibile (m s.l.m.)	H (= B+C+D) altezza min muro paraonde (m)
D.M. 24.03.1982	54,50	3,45	3,70	100,00	1,00	-	-	4,45	114,40	109,95	-
D.M. 24.03.1982 con muro paraonde	54,50	3,45	-	-	-	-	-	3,45	114,40	110,95	1,00
NT 2014	45,40	2,31	3,70	100,00	0,51	0,11	0,23	3,16	114,40	111,24	-
NT 2014 con muro paraonde	45,40	2,31	-	-	-	-	-	2,31	114,40	112,09	0,85

Si osserva come in nessuna delle ipotesi considerate la quota massima di regolazione di progetto (113,00 m s.l.m.) o la quota di massimo invaso di progetto (113,50 m s.l.m.) siano compatibili con il franco regolamentare. Risulta peraltro come le Norme tecniche 2014 siano meno restrittive delle precedenti riguardo al franco richiesto, soprattutto quando si preveda la realizzazione di un muro paraonde di almeno 85 cm di altezza (quello previsto dal progetto 15 gennaio 1969 dell'Ing. Algranati avrebbe avuto un'altezza di 90 cm).

6) STUDI IDROLOGICI

La portata massima di progetto della diga è 750 m³/s. Nella relazione del progetto esecutivo dello sbarramento sul rio Cuga del 12.09.1955, a firma dell'Ing. Velio Princivale, è riportato come il Servizio Idrografico, in sede di rilascio della concessione, avesse aumentato da 600 a 750 m³/s la previsione della portata di massima piena eccezionale. Nella stessa relazione il progettista afferma che tale valore risulta confrontabile con la portata di piena di bacini situati in zone più piovose aventi superficie tripla e che pertanto appare un evento quasi impossibile.

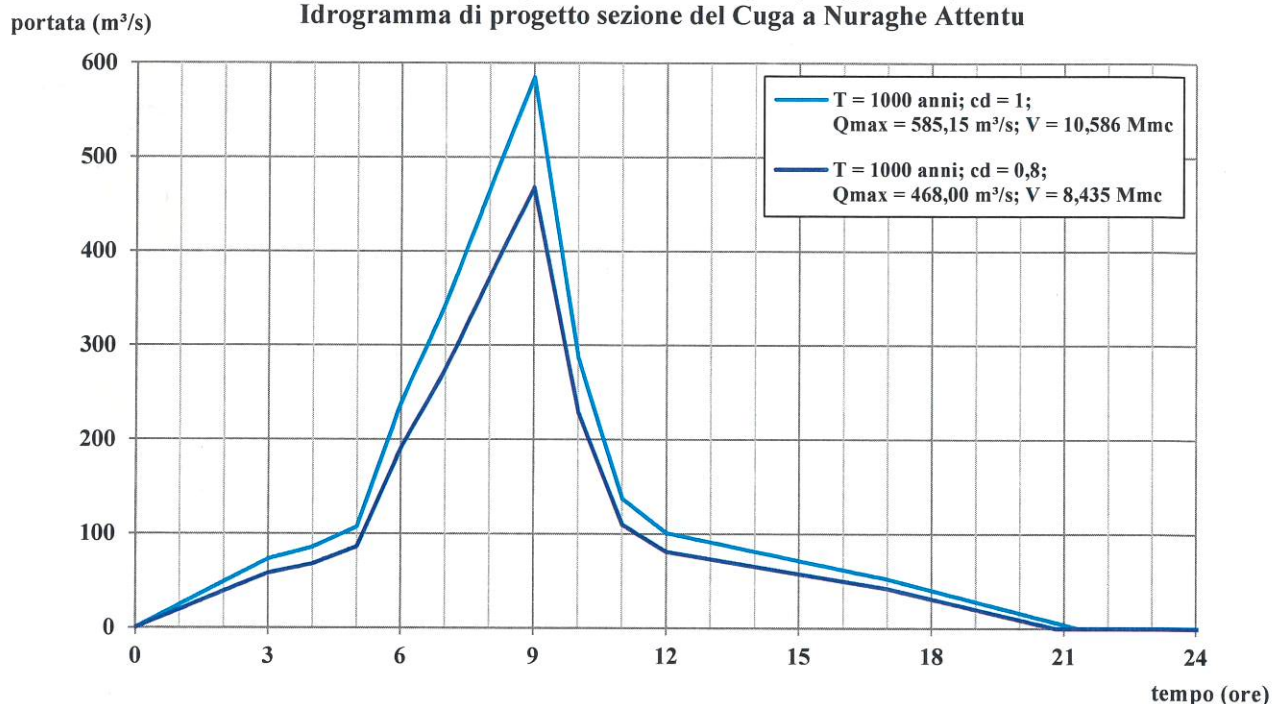
Ad ogni modo, il progetto assegna interamente allo sfioratore la funzione di scaricare la portata di massima piena, col che la quota di massimo invaso regolamentare ne risulta fissata a 113,50 m s.l.m. in cifra tonda (essendo 113,45 m s.l.m. la quota che la scala delle portate dello sfioratore, con paratoie completamente aperte, fa corrispondere ad un valore di portata pari a 750 m³/s).

Considerato come la portata di progetto, nel determinare la quota di massimo invaso, direttamente definiva anche il valore del franco, nel 2001 il Servizio Nazionale Dighe richiese che il Concessionario (all'epoca il Consorzio di Bonifica della Nurra) predisponesse *“un'idonea documentazione circa l'effettivo valore del franco netto, aggiornando anche gli studi idrologici sulla base dei dati attualmente disponibili”* (nota n. SDI/1584/UCPL del 7.03.2001). Dalla rivalutazione idrologica presentata dal Consorzio in più fasi, con intercorsi pareri del Servizio Idrografico della Sardegna, risultò infine un nuovo valore della portata di progetto pari a 579 m³/s per un tempo di ritorno di 1000 anni.

Nel maggio 2013 la Divisione 7, Ufficio Idraulica, della D.G. Dighe, chiamata a fornire un parere specialistico ai fini dell'adozione, da parte della Direzione, dei provvedimenti necessari per garantire la gestione in sicurezza del serbatoio, redasse uno studio idrologico orientato a verificare d'ufficio il grado di conservatività della portata di piena millenaria di 579 m³/s calcolata dal Gestore in base alle indicazioni del Servizio Idrografico e, nel contempo, a definire un idrogramma da associare alla portata di piena predetta, in modo da poter valutare anche l'effetto di laminazione del serbatoio.

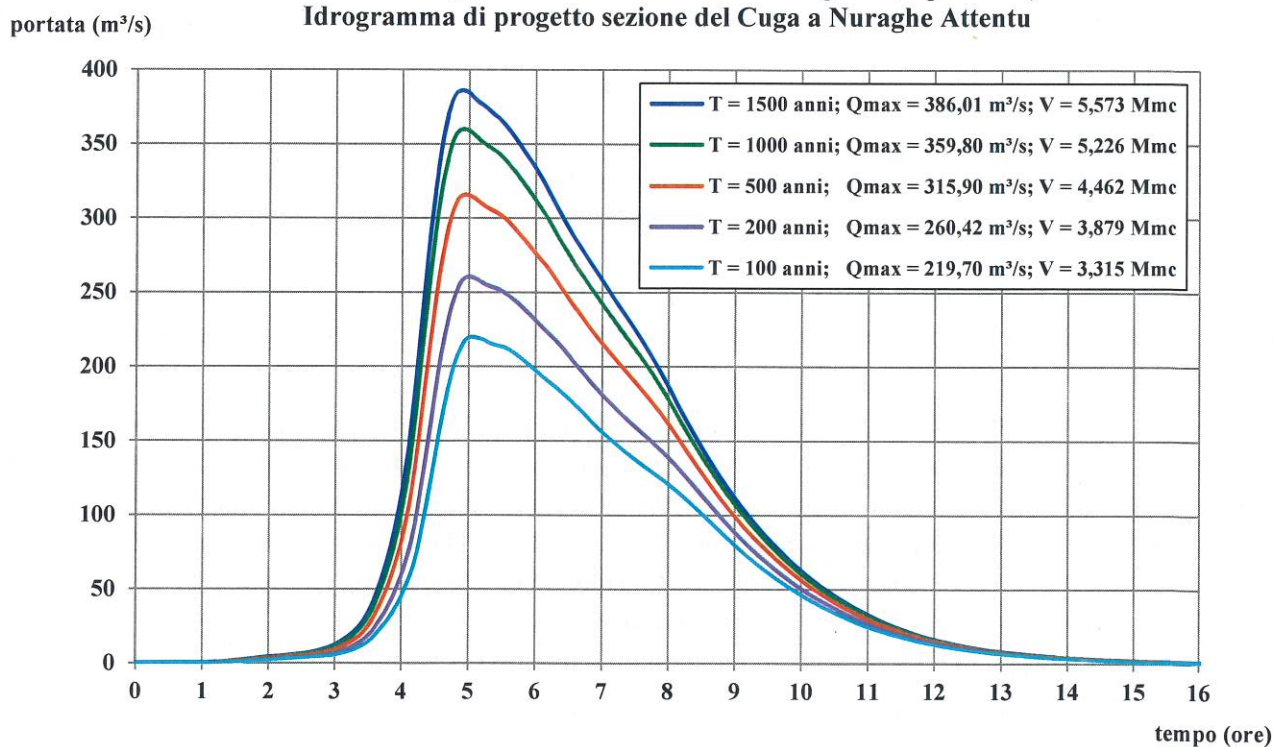
L'idrogramma di piena millenario derivante dalle valutazioni dell'Ufficio idraulica (UIDR) della D.G. Dighe presenta un valore di picco di 585,15 m³/s nell'ipotesi che il coefficiente di deflusso si assuma pari ad 1, e di 468 m³/s quando il coefficiente di deflusso si assuma pari a 0,8.

Studio idrologico UIDR D.G. Dighe (maggio 2013)
Idrogramma di progetto sezione del Cuga a Nuraghe Attentu



Da ultimo, in adempimento a quanto richiesto dalla D.G. Dighe ai sensi dell'art. 4, comma 1, del decreto-legge 29 marzo 2004, n. 79, convertito con legge 28 maggio 2004, n. 139, la Regione Autonoma della Sardegna e l'Ente Acque della Sardegna (ENAS), attuali concessionario e gestore dello sbarramento, commissionarono al DICAAR dell'Università di Cagliari uno studio di rivalutazione idrologica e idraulica, in esito al quale il valore della portata di massima piena risultò sensibilmente ridimensionato. In particolare, per un tempo di ritorno di 1000 anni, la portata di picco risulta pari a circa 360 m³/s.

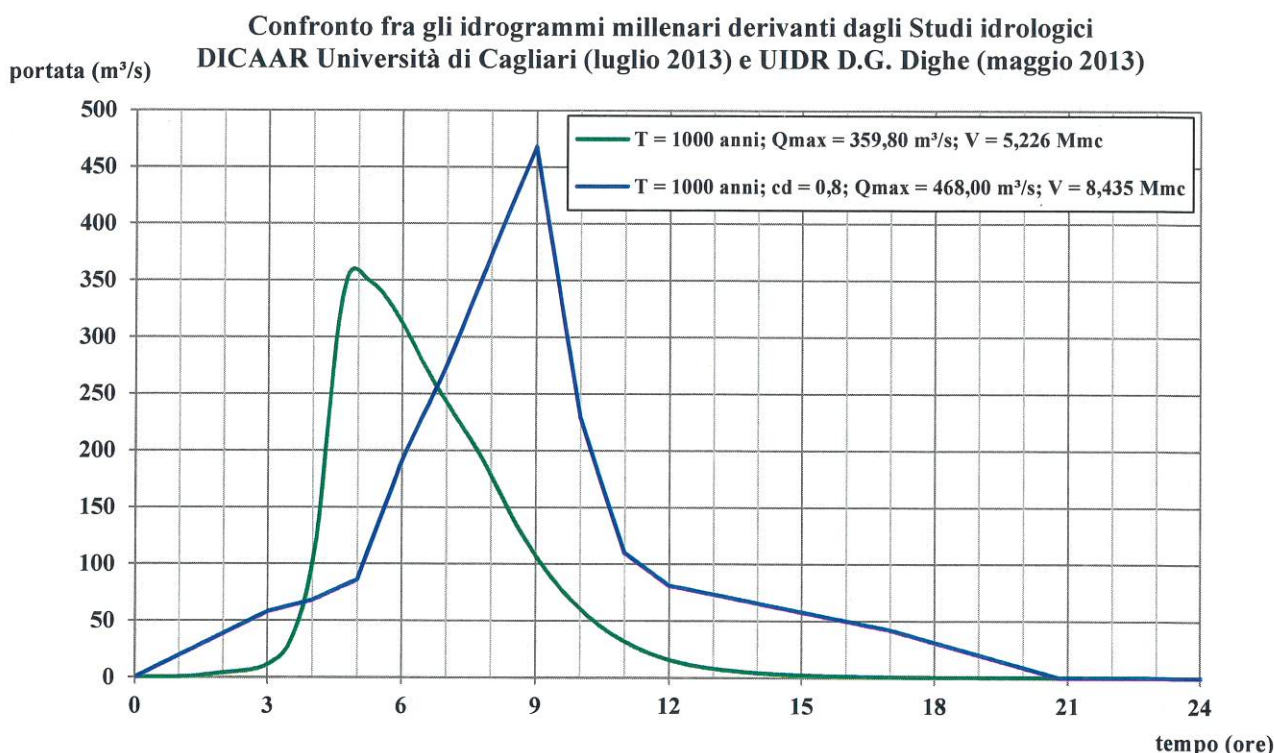
Studio idrologico DICAAR Università di Cagliari (luglio 2013)
Idrogramma di progetto sezione del Cuga a Nuraghe Attentu



Con nota n. 697 in data 12.01.2018, l'ENAS ha inviato alla D.G. Dighe una relazione tecnica che, riferendosi alle valutazioni idrologiche del DICAAR dell'Università di Cagliari e calcolando il franco di legge secondo le nuove NT 2014, proponeva una revisione delle portate di massima piena e dei livelli di massimo invaso e massima regolazione. La nota dell'ENAS precisava che dette valutazioni erano propedeutiche alla progettazione degli interventi di miglioramento della sicurezza idraulica previsti nell'ambito del Piano operativo Infrastrutture del Fondo Sviluppo e Coesione 2014-2020, finalizzati a risolvere il problema del franco.

Tuttavia l'Ufficio idraulica della D.G. Dighe, richiesto di un parere specialistico riguardo allo studio di rivalutazione idrologica e idraulica del DICAAR, con nota n. 5278 del 2.03.2018 ne ha ritenuto le conclusioni non sufficientemente cautelative, e ha confermato la validità dello studio idrologico redatto dallo stesso UIDR nel 2013, sia con riferimento alla portata di piena millenaria che con riferimento all'idrogramma di progetto (adottando quello relativo all'ipotesi di coefficiente di deflusso 0,8). Inoltre, l'UIDR ha suggerito la sostituzione dello scarico di superficie regolato con uno a soglia fissa.

La nota della Divisione 4 della D.G. Dighe n. 12914 del 31.05.2018 ha confermato questa impostazione, sia per quanto attiene alla portata di piena e all'idrogramma di progetto da assumersi a base della progettazione dei previsti interventi di miglioramento della sicurezza idraulica, sia per quanto attiene all'opzione di sostituire lo scarico di superficie regolato con uno a soglia fissa: *“si conferma che, data la tipologia di diga (FCEM - art. 2), la progettazione deve essere indirizzata ad una soluzione che, in coerenza con i punti C1 e H.3.3 delle NTD, preveda la modifica dello scarico di superficie da soglia regolata a soglia libera. Si precisa inoltre che l'ipotesi di utilizzare le attuali paratoie a ventola in condizioni di parziale apertura/chiusura non può essere considerata come soluzione ammissibile in via definitiva”*.



7) IPOTESI DI COLLAUDO NEL RISPETTO DEL FRANCO ALLA LUCE DELLA NOTA DELLA D.G. DIGHE N. 12914 DEL 31.05.2018

Sulla base delle indicazioni impartite dalla D.G. Dighe nella citata nota n. 12914 del 31.05.2018, la futura e definitiva conformazione dello scarico di superficie della diga del Cuga dovrà essere studiata nel rispetto dei seguenti parametri e condizioni:

- il franco regolamentare, da calcolarsi sulla base delle nuove Norme tecniche sulle dighe di cui al D. Min. II.TT. 26 giugno 2014, è pari 3,16 m in assenza di un muro paraonde, e a 2,31 m quando si realizzi un muro paraonde di altezza minima pari a 85 cm (vedi paragrafo 5). Di conseguenza, la quota massima raggiungibile (e dunque il massimo valore ammissibile per la quota di massimo invaso) nelle due ipotesi di assenza o presenza di un muro paraonde è pari, rispettivamente, a 111,24 m s.l.m. o 112,09 m s.l.m.;
- la conformazione dello scarico di superficie dovrà essere modificata prevedendo la realizzazione di una soglia libera, priva di organi di intercettazione;
- il progetto dello scarico superficie, nella sua nuova conformazione, dovrà essere condotto sulla base dello studio idrologico 2013 dell'Ufficio Idraulica della D.G. Dighe nell'ipotesi di coefficiente di deflusso 0,8, sia con riferimento alla portata di piena millenaria (468 m³/s) che con riferimento all'idrogramma di progetto, rappresentato dalla spezzata di coordinate:

tempo (ore)	portata (m³/s)	tempo (ore)	portata (m³/s)
0	0	9	468
3	58	10	229
4	68	11	110
5	86	12	81
6	191	17	42
7	274	18	31
8	373		

Su queste basi, esistono diverse ipotesi alternative su come il collaudo della diga può essere indirizzato e concluso nel rispetto del franco regolamentare:

1ª ipotesi: collaudo a quota 108 m s.l.m. (attuale quota di sfioro con paratoie dello scarico di superficie completamente abbattute).

In questa ipotesi, quando si mettesse in conto la portata di picco millenaria derivante dallo studio UIDR 2013 (468 m³/s), il carico idraulico sullo sfioratore sarebbe:

$$h = \left(\frac{Q}{59} \right)^{\frac{2}{3}} = 3,98 \text{ m}$$

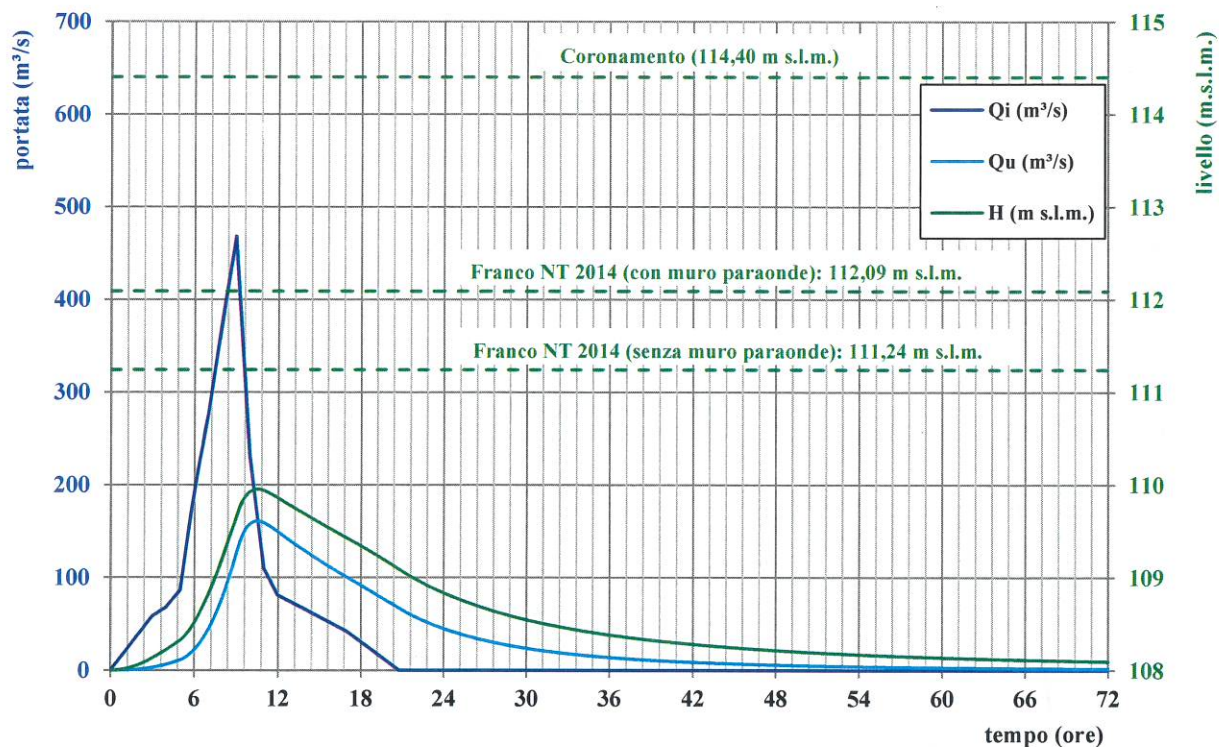
e la quota di massimo invaso $108 + 3,98 = 111,98 (> 111,24)$ m s.l.m.. Il franco di legge sarebbe rispettato, in base alle Norme tecniche 2014, solo quando si realizzasse un muro paraonde.

Quando per l'evacuazione della portata di progetto si tenesse conto del contributo dello scarico di fondo (opzione comunque non prevista nel progetto originario), considerato che in presenza di una quota di monte pari a 108 m s.l.m. lo scarico di fondo è capace di evacuare una portata di 72,55 m³/s, la portata millenaria da evacuarsi con lo sfioratore scenderebbe a circa 395 m³/s. Il carico idraulico sullo sfioratore sarebbe allora:

$$h = \left(\frac{Q}{59} \right)^{\frac{2}{3}} = 3,55 \text{ m}$$

e la quota di massimo invaso $108 + 3,55 = 111,55 (> 111,24)$ m s.l.m.. Dunque, anche in questo caso il franco sarebbe rispettato solo realizzando un muro paraonde.

Quando però si ragionasse non più in termini di portata di picco, ma di portata laminata, anche senza considerare il contributo dello scarico di fondo la portata massima uscente e la corrispondente quota di massimo invaso si ridurrebbero notevolmente: 160,67 m³/s e 109,95 m s.l.m. rispettivamente. Il franco di legge risulterebbe ampiamente rispettato anche senza muro paraonde.

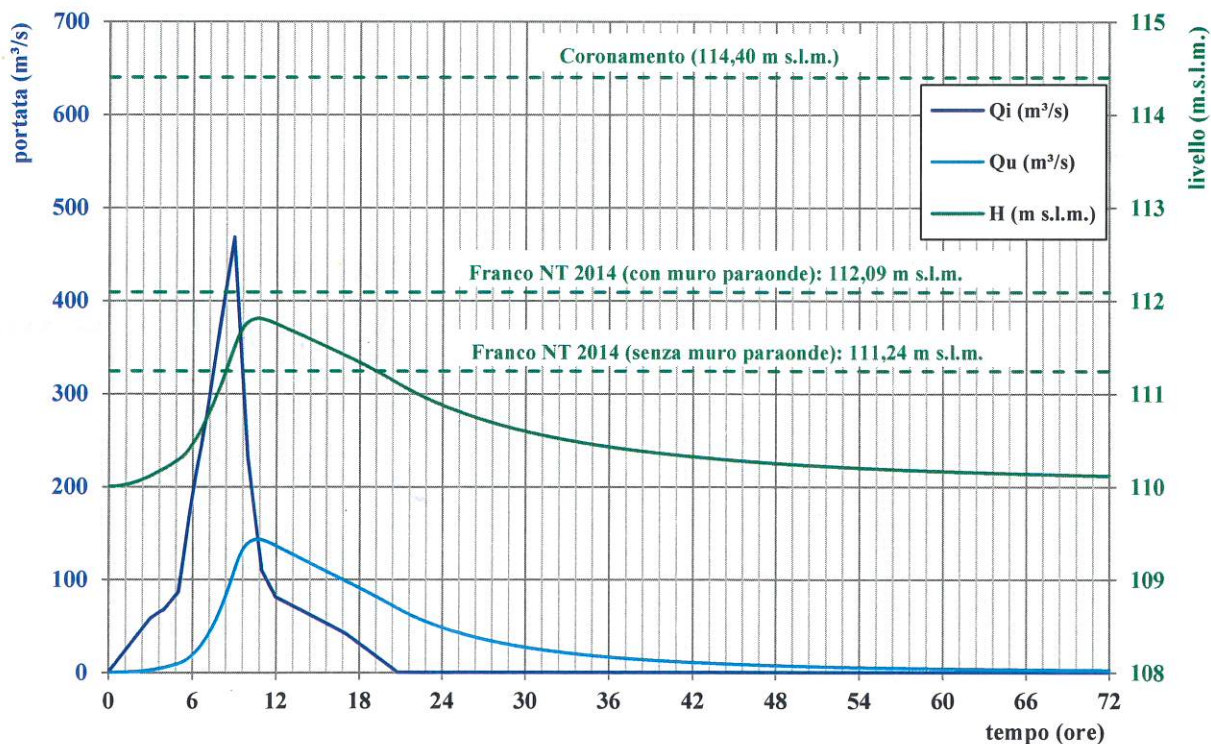


2^a ipotesi: collaudo a quota 110 m s.l.m.

In questa ipotesi, ammettendo che anche per lo sfioratore modificato ed elevato a quota 110 m s.l.m. possa ammettersi valida la relazione

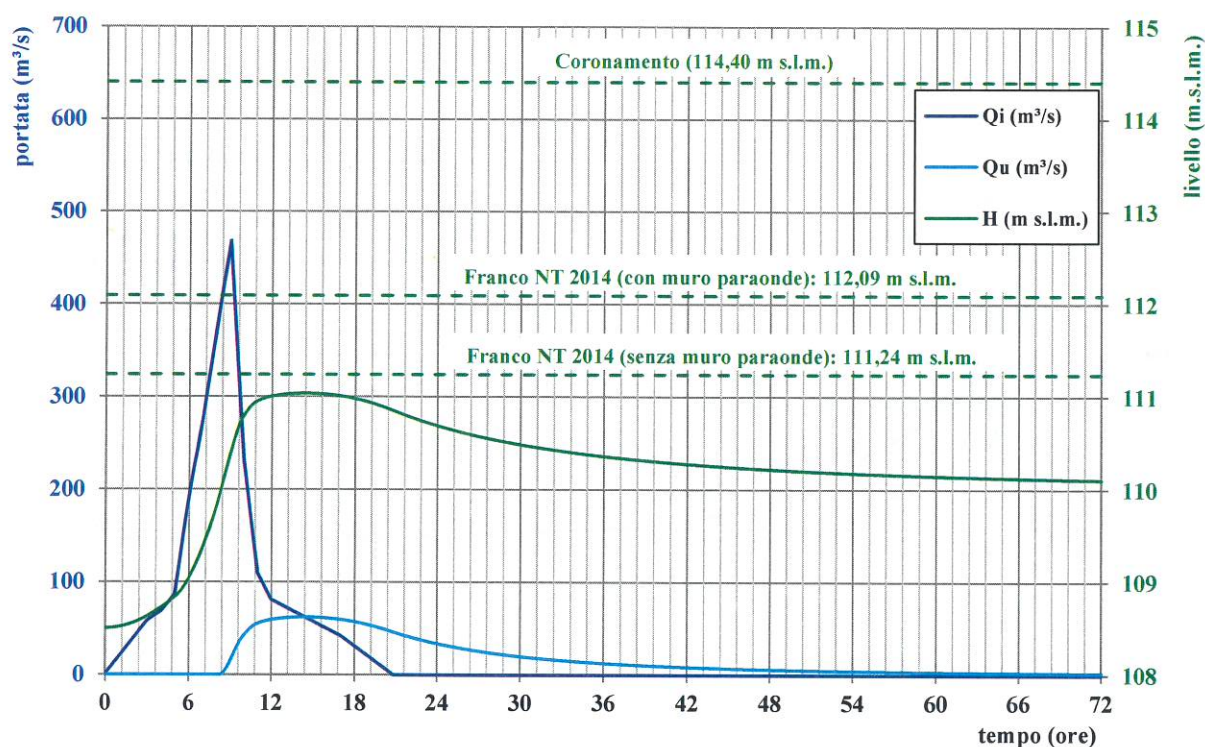
$$Q = 59 h^{3/2},$$

il calcolo di laminazione dell'idrogramma di progetto con quota iniziale nel bacino pari a 110 m s.l.m. restituisce il seguente diagramma delle portate e dei livelli:



La portata massima uscente risulta 143,11 m³/s; la corrispondente quota di massimo invaso 111,81 m s.l.m.. Si osserva che il franco di legge sarebbe rispettato solo quando si realizzasse un muro paraonde.

Ulteriori ipotesi potrebbero considerarsi in alternativa alla realizzazione del muro paraonde, come stabilire procedure di gestione che in vista di eventi meteorici intensi prevedano un pre-svaso del bacino. Ad esempio, fissando la quota iniziale di invaso a 108,50 m s.l.m., il franco sarebbe rispettato anche senza muro paraonde:



Ancora, si potrebbe assegnare anche allo scarico di fondo l'ufficio di contribuire alla laminazione dell'idrogramma di progetto, sebbene questo non fosse previsto nel progetto originale delle opere. Sono, queste, valutazioni che spettano all'Ente gestore. In ogni caso, è parere della Commissione di collaudo che la realizzazione del muro paraonde rimane un'ipotesi da prendere in considerazione, pur valutandone i costi oltre ai benefici, in quanto utile ad elevare di 85 cm il livello massimo raggiungibile nel rispetto del franco di legge.

Cagliari, 4 giugno 2018

Ing. Luigi Anselmo GHINAMI

Ing. Fabrizio ALTESE

Ing. Luca FARINA