

# DIGA DI CEPPO MORELLI

## PROGETTO DI ADEGUAMENTO

PROGETTO DEFINITIVO - Rev. 1

CRONISTORIA E RISPOSTE ALLE INTEGRAZIONI RICHIESTE  
DALLA DIREZIONE GENERALE PER LE DIGHE CON NOTA  
PROT. 4173 DEL 25.03.2013 A SEGUITO DEL VOTO N. 42 DEL  
18.12.2012 DELLA IV SEZIONE DEL CONSIGLIO SUPERIORE  
DEI LAVORI PUBBLICI



# INDICE

1.	PREMESSA.....	1
2.	STATO DI FATTO .....	2
3.	CRONISTORIA STUDI, INDAGINI E PROGETTI ESEGUITI .....	5
3.1.	REAZIONE ALCALI-AGGREGATI (AAR) .....	8
3.2.	INDAGINI SULLO SCARICO DI SUPERFICIE ESISTENTE .....	8
3.3.	SINTESI DELLO STATO DI FATTO .....	11
4.	SCELTA DELLA NUOVA STRUTTURA AD ARCO-GRAVITÀ .....	13
4.1.	PROGETTO DEFINITIVO (DICEMBRE 2009) .....	13
4.2.	INTEGRAZIONI AL PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO (DICEMBRE 2009) PRESENTATE A MAGGIO 2011 .....	16
5.	INTEGRAZIONI AL PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO (DICEMBRE 2009) RICHIESTE DALLA DIREZIONE DIGHE CON NOTA PROT. 4173 DEL 25.03.2013 A SEGUITO DEL VOTO N. 42 DEL 18.12.2012 DELLA IV SEZIONE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI .....	18

## **1. PREMESSA**

Nel presente documento è riportata una descrizione dello stato di fatto della diga e delle sue opere di scarico, una dettagliata cronistoria di tutti gli studi, le indagini e i progetti eseguiti, e le motivazioni che hanno portato alla scelta della soluzione di realizzare una nuova struttura ad arco-gravità, presentata con il progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009), unitamente ad una breve descrizione dello stesso e delle integrazioni presentate nel maggio 2011.

Con Voto n. 42 del 18.12.2012 la IV Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (C.S.LL.PP.) chiedeva integrazioni al progetto definitivo 2009, che venivano riassunte dalla Direzione Generale per le Dighe (D.D.) con la nota prot. 4173 del 25.03.2013. Il Concessionario, con nota prot. 1274 del 17.06.2013, rispondeva alle richieste della D.D. presentando il proprio programma di indagini e studi integrativi, in base ai quali è stato aggiornato il progetto definitivo, che vengono illustrati in calce a questo documento, rimandando per gli approfondimenti alle relazioni specialistiche di questa nuova revisione progettuale: "Diga di Ceppo Morelli – Progetto di adeguamento – Progetto definitivo – Rev.1" (ottobre 2015).

## 2. STATO DI FATTO

La diga di Ceppo Morelli, costruita nel 1929, sbarra il Torrente Anza, affluente destro del Fiume Toce, poco a monte dell'abitato di Ceppo Morelli; lo sbarramento regola giornalmente l'energia producibile dall'impianto idroelettrico di Battiglio.

Dal punto di vista geologico, l'opera è in una zona di origine glaciale costituita da roccia di natura gneissica, di ottime caratteristiche geomeccaniche, con pareti pressoché verticali.

Le principali caratteristiche del bacino imbrifero sotteso allo sbarramento e del serbatoio generato dallo stesso sono riportate in Tabella 1.

Quota di massima regolazione	780,75	m s.m.
Quota di massimo invaso di progetto (coincidente con quella dell'ultimo Foglio di Condizioni per l'Esercizio e le Manutenzione, nel seguito indicato come F.C.E.M.)	782,50	m s.m.
Volume di invaso (ultimo rilievo del 2014)	45.000	m <sup>3</sup>
Volume utile di regolazione (ultimo rilievo del 2014)	42.000	m <sup>3</sup>
Superficie bacino imbrifero direttamente sotteso	124,50	km <sup>2</sup>
Superficie bacino imbrifero allacciato	32,50	km <sup>2</sup>
Superficie totale bacino imbrifero	157,00	km <sup>2</sup>

**Tabella 1**

La diga è in calcestruzzo, ad arco non trascinabile. L'estradosso è a centro unico ed il raggio varia da 19 m in sommità a 10,40 m alla base. L'intradosso è invece a tre centri con due raggi: uno è in corrispondenza della parte centrale dell'arco, e l'altro interessa solo le estremità verso le imposte; le aperture angolari sono comprese rispettivamente tra 110° e 140°.

La sezione verticale in chiave presenta all'estradosso una pendenza verso valle del 20% per circa la metà superiore della diga.

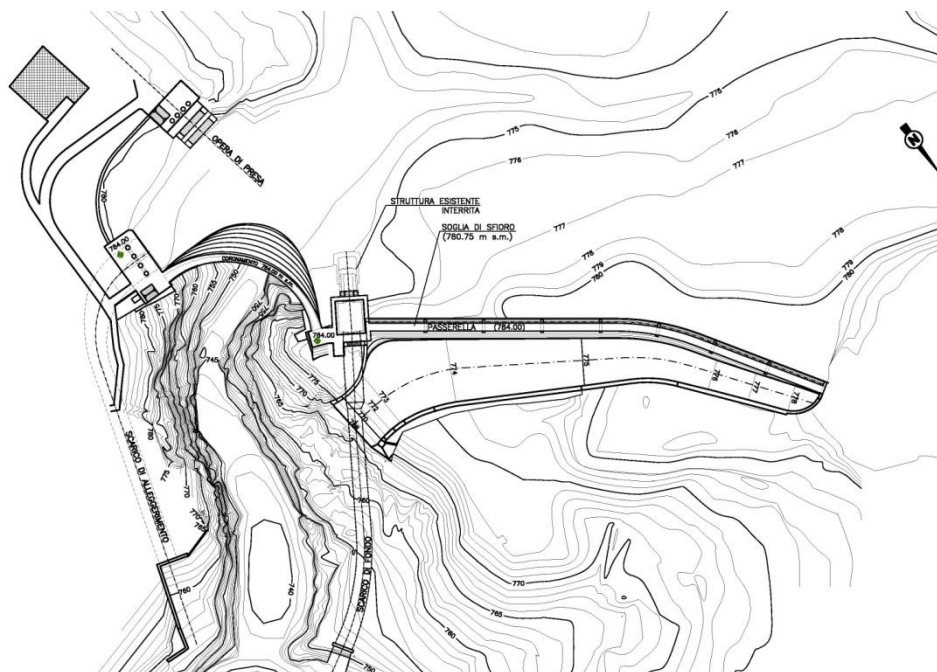
Le caratteristiche principali della diga sono riportate in Tabella 2.

Altezza del piano di coronamento, a quota 784,00 m s.m., sul punto più depresso delle fondazioni	46,00	m s.m.
Altezza del piano di coronamento sul piano dell'alveo a valle	39,00	m s.m.
Franco	1,50	m
Sviluppo del coronamento	36,50	m
Spessore dell'arco a coronamento	1,00	m

**Tabella 2**

In Figura 1 si riporta una planimetria della diga e delle sue opere di scarico, mentre in Figura 2 una immagine da valle della diga, con a sinistra lo sbocco della galleria dello

scarico intermedio e a destra la restituzione del canale dello scarico di superficie.



**Figura 1**



**Figura 2**

Il calcestruzzo dello sbarramento ha un dosaggio di cemento di  $300 \text{ kg/m}^3$ ; in corrispondenza dei paramenti è disposta un'armatura metallica di barre verticali e orizzontali con diametro e distanze variabili. Il paramento di monte è rivestito con gunite retinata.

La diga appoggia direttamente sulla roccia di fondazione, senza pulvino, fino a quota 768 m s.m.; nella parte superiore dell'opera, oltre quota 776 m s.m., la diga si collega a due spalle a gravità in calcestruzzo. Non sono stati previsti sistema drenante e giunti di costruzione, pertanto la diga si presenta essenzialmente monolitica e saldamente collegata alle sue fondazioni.

Lo sbarramento è munito di tre opere di scarico: uno scarico di superficie, uno intermedio e uno di fondo.

Lo scarico di superficie con ciglio a quota 780,75 m s.m. è sistemato sullo sperone roccioso in sponda sinistra ed è costituito da otto luci a soglia libera della larghezza di 10,50 m ciascuna. Un canale a valle dello sfioratore raccoglie le acque e le convoglia nel letto del torrente.

In Figura 3 si può vedere un'immagine del canale dello scarico di superficie alimentato dalle luci sfioranti.



**Figura 3**

Lo scarico intermedio è ubicato sulla sponda destra della diga ed è costituito da due luci con soglia a quota 770,00 m s.m. intercettate da paratoie piane di 3,00 x 4,00 m (lunghezza x altezza) con comando oleodinamico (3 fonti di energia) e pompa a mano di riserva. Le acque sono scaricate a valle mediante apposita galleria.

Lo scarico di fondo è ubicato sulla sponda sinistra tra lo sfioratore e la spalla della diga e consiste in una luce di 2,60 · 2,60 m con soglia di imbocco a quota 758,00 m s.m. provvista di una paratoia piana e di una a settore in serie comandabili dall'alto da un'apposita cabina. Le acque di scarico sono raccolte da una galleria che attraversa lo sperone roccioso e vengono convogliate lontano dalla diga.

Il trasporto solido del Torrente Anza ha causato un progressivo interrimento del serbatoio che oggi fa sì che i sedimenti arrivino in prossimità del paramento di monte della diga fino a circa 773 m s.m.

Per queste ragioni dal 1939 lo scarico di fondo risulta interrato e conseguentemente inutilizzabile. L'esercizio limitato nel tempo di questo organo di scarico era però già previsto dal Progettista e dai Collaudatori dello sbarramento che infatti nella Relazione di Collaudo dicono "... Essendo prevedibile l'interrimento dello scarico di fondo ..."

Le funzioni di legge dello scarico di fondo sono pertanto state egregiamente svolte, negli ultimi 75 anni, dallo scarico intermedio, molto più capace dello scarico di fondo originario.

### 3. CRONISTORIA STUDI, INDAGINI E PROGETTI ESEGUITI

A seguito di richiesta del Servizio Dighe, il Servizio Idrografico di Parma, con nota n. 1715 del 06.08.1996, definisce in 2.000 m<sup>3</sup>/s la portata con tempo di ritorno di 500 anni da prevedersi per la diga di Ceppo Morelli.

Il Servizio Dighe, sottolineando l'enorme differenza con le valutazioni progettuali ( $Q_{max} = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ ) prescriveva al Concessionario con nota 7465/UCCE del 27.11.1996, di predisporre ricerche idrologiche sulle massime piene prevedibili al sito e, successivamente, di individuare soluzioni idonee a garantirne lo smaltimento.

Considerata la delicatezza dell'argomento, veniva incaricato dello studio idrologico il Prof. Renzo Rosso del Politecnico di Milano, che, con relazione in data 15.05.1997, definiva la piena millenaria in 1.003 m<sup>3</sup>/s. Conseguentemente nel 1997/98 veniva presentato il progetto di adeguamento degli scarichi, che comportava l'innalzamento di 1,5 m della quota di massimo invaso (dalla 782,50 m s.m. alla 784,00 m s.m., attuale quota di coronamento) e presentava analisi numeriche per le verifiche di sicurezza della diga, che già prevedeva l'appesantimento della spalla a gravità in sinistra.

Gli studi geologico-tecnici sulla roccia di imposta e sul versante detritico a valle della diga in sponda sinistra, l'esame congiunto col Servizio Dighe delle varie problematiche progettuali, portava alla conferma della nuova portata di progetto di 1.000 m<sup>3</sup>/s e alla redazione del progetto esecutivo agosto 2000, con la meditata e documentata proposta di abbandono dello scarico di fondo e la realizzazione di un nuovo canale adiacente a quello attuale dello scarico di superficie.

I dissesti verificatisi nell'ottobre 2000 sul versante sinistro circa 1 ÷ 2 km a monte della diga, hanno comportato la limitazione di invaso e la sospensione dell'iter istruttorio del progetto. Esaurita questa "emergenza" l'istruttoria è proseguita nel 2004 ed è culminata nel Voto n. 152 del 29.07.2004 della IV Sezione del Consiglio Superiore dei LL.PP. che, in particolare prescrive:

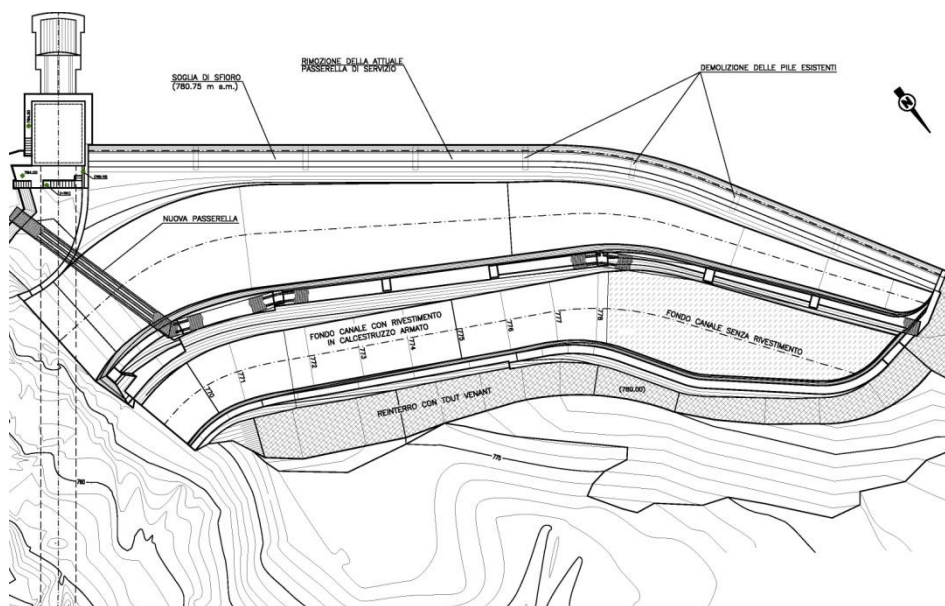
- 1) la portata di massima piena di 1.100 m<sup>3</sup>/s con tempo di ritorno di 500 anni, da ricondurre a  $T_r = 1000$  anni;
- 2) il "recupero di efficienza dello scarico di fondo".

Entrambi gli argomenti sono stati oggetto di incontri, scambi di note e chiarimenti con gli Uffici Competenti che hanno consentito:

- 1) l'aggiornamento delle valutazioni idrologiche del 1997, sfruttando quasi un decennio di ulteriori dati, che ha portato alla definizione della piena millenaria di 1.187 m<sup>3</sup>/s. La conseguente redazione del progetto definitivo (dicembre 2005) che comporta l'ulteriore incremento (di 50 cm) nella quota di massimo invaso (alla 784,50 m s.m.) e del coronamento (alla 785,50 m s.m.), e la realizzazione del nuovo canale di scarico adiacente a quello attuale dello scarico di superficie.

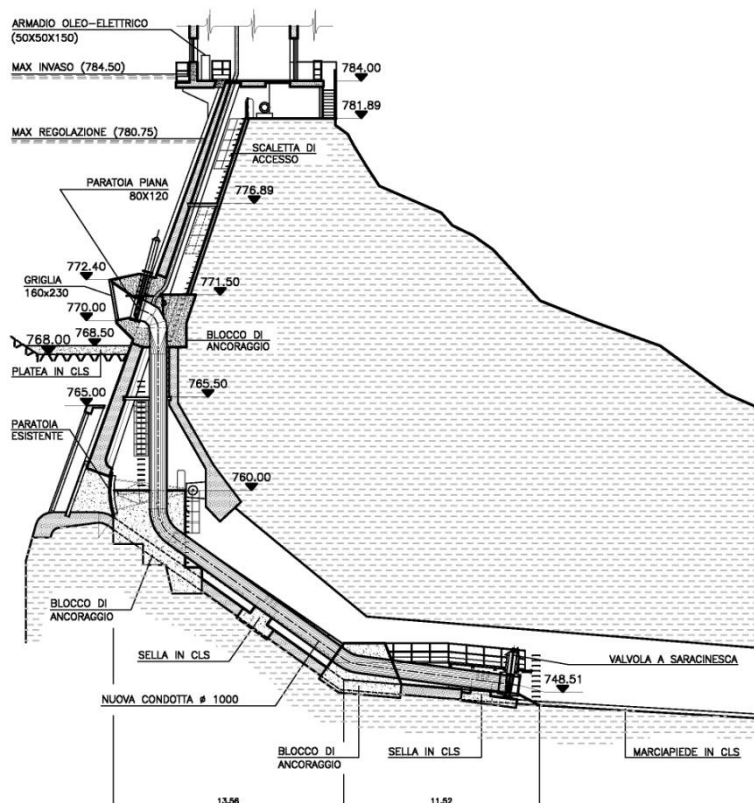
In Figura 4 si riporta una planimetria della nuova configurazione presentata per lo scarico di superficie.





**Figura 4**

- 2) Il progetto definitivo "Parziale ripristino dello scarico di fondo – marzo 2007".  
 In Figura 5 si può vedere una sezione del ripristino dello scarico di fondo.

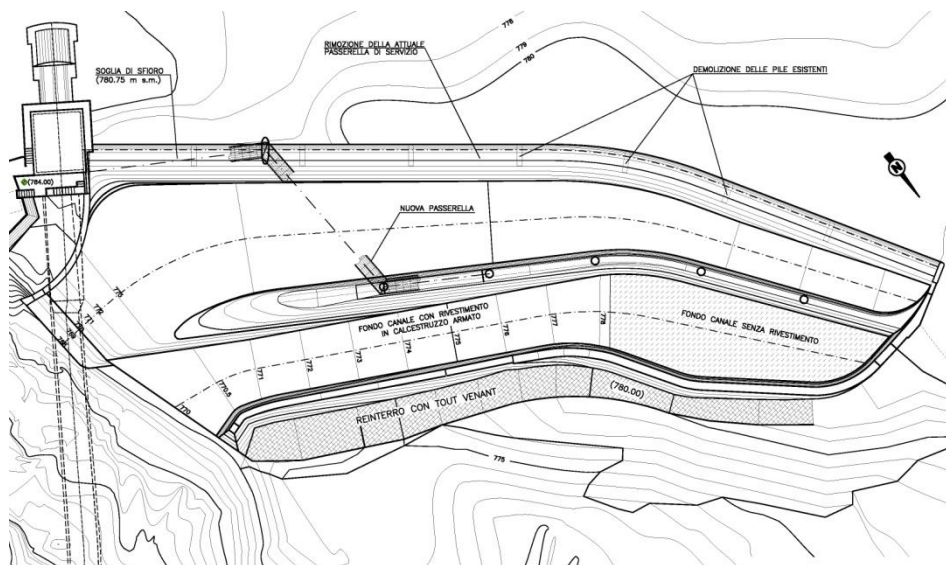


**Figura 5**

Sono infine state eseguite le prove su modello idraulico della nuova configurazione dello scarico di superficie del progetto dicembre 2005; la documentazione finale (dicembre 2007) è stata consegnata all'Ufficio Dighe. Le modifiche alla configurazione



dello scarico di superficie risultanti dal modello sono rappresentate in Figura 6.



**Figura 6**

Oltre alle prove su questa nuova configurazione, sono state eseguite anche prove sulla configurazione attuale dello scarico (senza però le pile della passerella e avendo opportunamente sopraelevato il suo muro di valle). Lo scopo di quest'ultima campagna di indagini era quello di valutare, senza il nuovo canale laterale, i livelli idrici lungo il muro di valle attuale e le sollecitazioni idrodinamiche su di esso per i livelli di invaso di 782,50 m s.m. e 784,50 m s.m. (nuova quota di massimo invaso approvata con l'istruttoria al progetto del dicembre 2005).

Le prove su questo modello, eseguite da Protecno S.r.l., hanno dimostrato che la capacità di scarico con quote di invaso elevate è maggiore di quella risultante dallo schema di funzionamento valido per quote di invaso inferiori. Quest'ultimo schema di funzionamento si può sintetizzare suddiviso in due parti:

- 1° Sfiore libero dell'invaso nel canale, che all'aumento del livello di invaso, e quindi della portata complessiva nel canale, rigurgita sempre di più a partire dalle sezioni più a monte.
- 2° Deflusso nel canale in corrente lenta sino alla sezione di controllo determinata dal restringimento planimetrico e dall'aumento della pendenza di fondo, sezione nella quale si stabiliscono le condizioni critiche della corrente.

Il funzionamento invece per quote del serbatoio prossime al nuovo massimo invaso non è più quello sopra schematizzato, ma, con un effetto che è difficilmente osservabile nelle fotografie (chiarissimo "de visu"), la corrente è sicuramente "veloce" almeno per metà del canale ed il richiamo e l'accelerazione della corrente è ben visibile nell'invaso 10÷15 m a monte della soglia dello sfioratore.

### **3.1. REAZIONE ALCALI-AGGREGATI (AAR)**

Con riferimento alla relazione di Cesi Ricerca S.p.A. "Analisi con modello numerico per la determinazione dello stato tensio-deformativo della diga di Ceppo Morelli" (marzo 2009), allegata al progetto preliminare di adeguamento (marzo 2009), si riassumono qui di seguito gli esiti delle indagini che hanno portato a riconoscere nell'AAR la causa di alcune anomale deformazioni della diga ed i risultati degli studi sullo stato tensionale nella struttura.

La diga di Ceppo Morelli viene attualmente monitorata attraverso misure di collimazione, triangolazione e livellazione. Le misure di collimazione sono eseguite a partire da un punto fisso in sponda destra verso due mire fisse in spalla sinistra.

Dal 1983 queste misure sono state integrate con quelle di un sistema di misure di triangolazione, eseguite a partire da una base di triangolazione in sponda destra.

L'aggiunta delle misure di triangolazione ha avuto un duplice significato: consentire di dissipare i dubbi sulla validità delle misure di collimazione, (verifica della stabilità delle mire fisse), e fornire entrambe le componenti orizzontali degli spostamenti dei tre punti monitorati.

Le misure di collimazione e di triangolazione sono risultate mutuamente in buon accordo; esse hanno segnalato il progressivo svilupparsi di un anomalo spostamento di deriva verso monte. Le misure di livellazione, iniziate nel 1996, hanno evidenziato la presenza di una componente di deriva anche verso l'alto.

L'esame complessivo di tutte queste misure consente di affermare che da oltre 30 anni è in corso un fenomeno graduale di deriva sia verso monte che verso l'alto.

Per trovare una spiegazione a questa deriva, sono stati eseguiti studi su campioni di calcestruzzo: queste indagini (petrografiche e chimiche) hanno evidenziato la presenza del fenomeno della reazione alcali-aggregati (AAR) con un potenziale espansivo dell'AAR che continuerà per almeno altri 25÷35 anni.

Individuata nell'espansione del calcestruzzo la causa delle derive osservate, si è iniziato a studiarne e valutarne gli effetti statici sulla diga, mediante analisi numeriche e prove in situ (sovracarotaggi), fra di loro correlabili in quanto eseguite nelle "stesse" condizioni termiche e di invaso.

### **3.2. INDAGINI SULLO SCARICO DI SUPERFICIE ESISTENTE**

Durante un sopralluogo in diga nell'estate 2007, si è notata un'abrasione nel rivestimento interno del canale dell'esistente scarico di superficie, che metteva a nudo un grosso inerte. Si sono allora eseguite una ventina di finestrelle (~20×20 cm<sup>2</sup>) nel rivestimento: è risultato che sia la soglia dello sfioratore che il muro di valle sono costituiti da muratura di pietrame con malta, peraltro di qualità molto buona senza evidenti segni di attacco per reazione AAR.

In Figura 7 si possono vedere alcune finestrelle eseguite lungo il muro dello sfioratore, mentre in Figura 8 il particolare di una di esse.



**Figura 7**

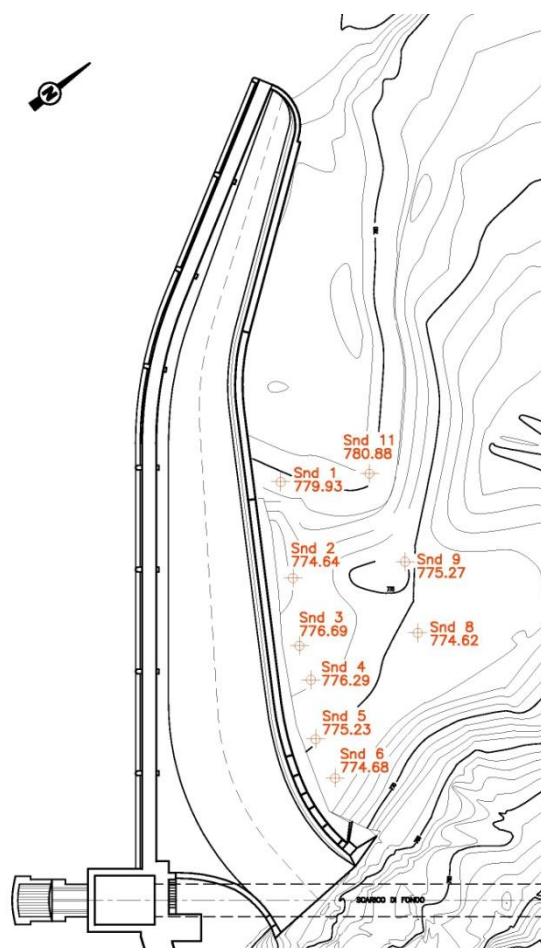


**Figura 8**

In ottemperanza alla prescrizione contenuta nella nota del RID/UCCE del 23.06.2006 di approvazione del progetto definitivo del dicembre 2005 (in cui al punto 6 è detto "in sede di realizzazione del nuovo canale... eseguire ulteriori indagini geognostiche atte a definire..."), sono poi stati eseguiti 9 sondaggi in corrispondenza del muro di valle dello sfioratore nella sua parte finale; in queste posizioni infatti il progetto originario (1931)

indicava che il muro di valle fosse appoggiato su detrito. In occasione del progetto esecutivo del 2000 la zona era stata oggetto di indagini geofisiche che avevano evidenziato la strana struttura "a sedia" della fondazione rocciosa, sulla base della quale era stato elaborato il progetto del canale di valle.

In Figura 9 è riportata l'ubicazione planimetrica dei sondaggi eseguiti (con la relativa quota di testa foro).



**Figura 9**

I nuovi sondaggi sostanzialmente confermano l'interpretazione della geofisica, anche se in alcuni punti la roccia sana si trova a profondità di 3÷4 m maggiore di quanto ipotizzato; ciò comunque non inficerebbe la sostanza del progetto.

Invece la scoperta che le strutture esistenti siano costituite di muratura di pietrame, ne rende ipotizzabile la completa (o quasi completa) demolizione e ricostruzione con calcestruzzo, ciò che costituirebbe un notevole aggravio di tempi (e costi) ed una molto maggiore esposizione a rischi di alluvione del cantiere.

D'altra parte, come già detto, la muratura appare di buona qualità, ed il manufatto ha subito eventi di piena notevoli e quindi importanti spinte sul muro di valle (fondato su detriti!). Significa che il notevole rinfianco di valle (~7÷8 m in corrispondenza del sondaggio 8 di Figura 9) ha fatto il suo dovere impedendo rotazioni del muro: non si



notano infatti fessure al piede di monte del muro.

### **3.3. SINTESI DELLO STATO DI FATTO**

Si riporta qui di seguito l'elenco delle numerose indagini svolte sulla diga di Ceppo Morelli:

- La misura degli spostamenti assoluti al coronamento della diga (collimazione, triangolazione e livellazione);
- Le prove di laboratorio su provini di calcestruzzo, in fase di costruzione ed estratti dal corpo diga;
- Le misure in situ dello stato tensionale, mediante sovracarotaggi (Sial.tec – 2006);
- La prova in situ di vibrazione forzata, che ha permesso di comprendere i modi di vibrare della struttura (Cesi Ricerca – 2008);
- L'analisi chimico/petrografia delle carote estratte dal corpo diga (Cesi Ricerca-ERSE-RSE – 2008-2011);
- I sondaggi effettuati dal coronamento, in corrispondenza degli attacchi arco-spalla (S.In.Ge.A. – 2008);
- L'analisi delle murature dello scarico di superficie e i sondaggi eseguiti in prossimità del muro di valle del suo canale di scarico (S.In.Ge.A. – 2008);
- *Le analisi numeriche ad elementi finiti, eseguite a partire dalla fine degli anni '90, da parte di Enel-Cris, Cesi Ricerca (ex Enel-Cris, poi Erse oggi RSE), svolte per diverse condizioni di carico e con diverse condizioni al contorno, per valutare lo stato tensionale dello sbarramento nella situazione odierna, in condizioni elastico-lineari, dopo oltre 30 anni di espansione da AAR (le misure indicherebbero l'inizio del fenomeno verso la fine degli anni '70). Le analisi sono state eseguite anche considerando ulteriori 30 anni di espansione futura sia per la diga integra che per due configurazioni di parzializzazione della stessa, conseguenti all'ipotetica demolizione di tutta la parte di calcestruzzo posta sopra alle quote rispettivamente di 778 m s.m. e 770 m s.m.*

Tutto quanto sopra sinteticamente richiamato, consente di affermare che:

- Il calcestruzzo della diga di Ceppo Morelli è affetto dalla reazione AAR.
- Questa situazione ha alterato lo stato tensionale della diga, rispetto alle originarie valutazioni progettuali.
- La situazione attuale in una valutazione ingegneristica complessiva, non è da considerarsi tale da non consentire oggi un giudizio positivo circa il suo esercizio in condizioni di sicurezza.
- Lo studio dello stato tensionale evidenzia come oggi si siano formate zone di trazione all'attacco volta-spalle (la struttura ha "naturalmente" reagito liberandosi nelle zone critiche). Le analisi a seguito di ulteriori 30 anni di espansione denunciano sostanzialmente un incremento delle compressioni al paramento di valle nelle zone inferiori e laterali della diga. Le ipotesi di parzializzazione dello sbarramento a quota 778 e 770 m s.m. mostrano una modesta, ma non significativa, variazione degli sforzi sulla struttura sia nella configurazione odierna che a seguito di ulteriori 30 anni di espansione.

- La reazione AAR non è completata e proseguirà ancora lentamente negli anni, con conseguente aggravio dello stato tensionale e deformazionale come documentato nella relazione di Cesi Ricerca (marzo 2009).
- Le prove su modello idraulico hanno evidenziato una capacità dell'attuale scarico di superficie per la nuova quota di massimo invaso (784,50 m s.m.) superiori al previsto, ma comunque sufficienti, insieme allo scarico di intermedio, ad evacuare solo l'80% dell'onda di piena millenaria determinata dal Prof. Rosso (1187 m<sup>3</sup>/s).



## **4. SCELTA DELLA NUOVA STRUTTURA AD ARCO-GRAVITÀ**

Alla luce delle considerazioni precedenti e sulla base delle informazioni oggi disponibili lo stato di fatto dello sbarramento e dell'invaso di Ceppo Morelli si può così sintetizzare:

- Assise di fondazione, costituita da rocce di qualità eccezionale, tenace e rigida, con poche discontinuità di scarsa importanza: la doverosa rivisitazione geologico-geomeccanica è stata effettuata nel 2009, ed integrata negli anni successivi.
- Tenuta idraulica dell'imposta della diga esistente assicurata sia dalla qualità della roccia che dai trattamenti effettuati in fase di costruzione; oggi tamponata anche dall'estesa coltre di sedimenti anche fini (limi) che colmano l'invaso, a ridosso del paramento di monte, fino a circa 10 m sotto l'attuale piano di coronamento.
- Struttura esistente costituita da una esile volta in calcestruzzo (1 metro di spessore a coronamento) con estese armature sui paramenti, che a monte si addentrano nelle imposte rocciose. Le svariate analisi numeriche ad elementi finiti eseguite della struttura esistente formano un quadro tranquillizzante, consigliando solo un appesantimento della spalla artificiale sinistra della diga. La comprovata espansione del calcestruzzo della diga per reazione alcali-aggregati (questi provenivano da frantumazione della risulta degli scavi della galleria di derivazione) provoca già oggi, secondo le numerose analisi ad E.F. effettuate, tensioni molto maggiori, ma che neppure tra 30 anni (data del presunto esaurimento della reazione) comporterebbero rischi di collasso della struttura.
- *La morfologia della stretta continua con le medesime caratteristiche sopra descritte, per circa un centinaio di metri verso valle.*

Su questo "stato di fatto" è stato necessario intervenire per ottenere:

- 1) di riportare la diga entro limiti tensionali "regolamentari";
- 2) di garantire i requisiti di sicurezza idraulica, assicurando lo scarico della portata integrativa necessaria per evacuare la nuova onda di piena millenaria.

Per soddisfare entrambe queste necessità, il Concessionario ha presentato il progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009), che prevede la realizzazione di una struttura di rinforzo a valle di quella esistente che trasformi la diga nel tipo ad arco-gravità.

### **4.1. PROGETTO DEFINITIVO (DICEMBRE 2009)**

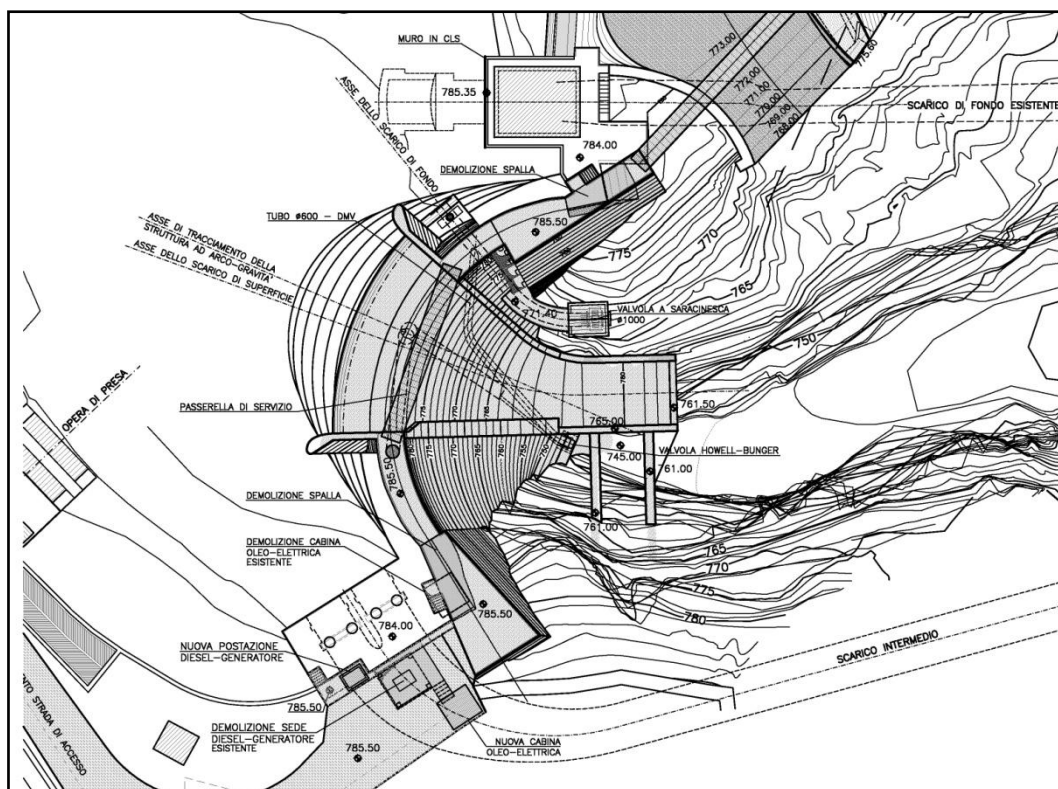
La nuova struttura ad arco-gravità prevista nel progetto definitivo (dicembre 2009), in perfetta continuità con il progetto preliminare (marzo 2009) approvato con nota prot. 90524 dall'Ufficio Tecnico per le Dighe di Torino, ha coronamento a quota 785,50 m s.m., garantendo così un franco di oltre 1 m nei confronti del livello di massimo invaso risultante dalle ultime prove su modello idraulico (784,33 m s.m.).

Quanto alla necessità 1) (v. § 4) è evidente che la nuova struttura di rinforzo potrà utilmente sfruttare come cassero a monte la diga esistente, che però dovrà essere lasciata liberamente espandere (verso monte e verso l'alto) e quindi non dovrà essere strutturalmente collegata nelle parti in elevazione alla struttura di valle.

Le due strutture saranno invece organicamente collegate all'imposta per realizzare la tenuta a monte, mentre il restante contatto roccia/calcestruzzo della struttura di valle sarà liberamente drenante.

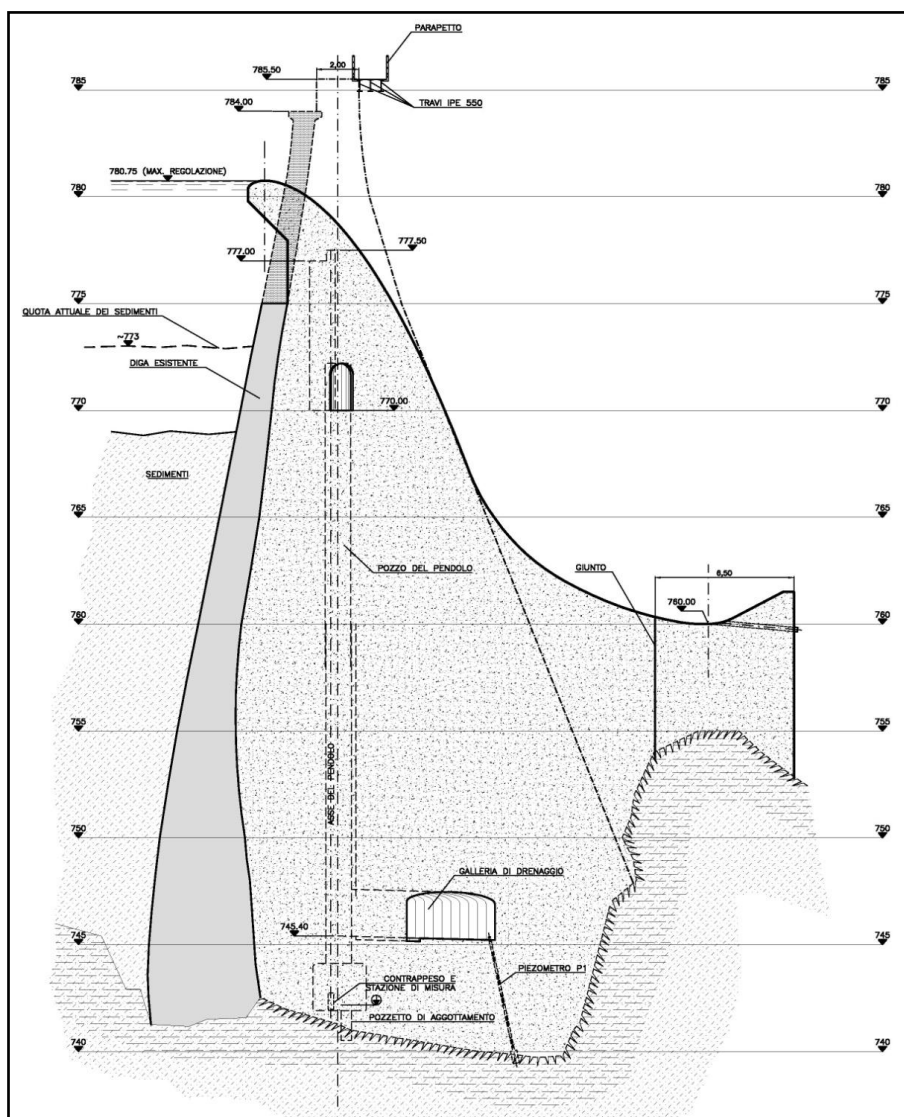
Quanto alla necessità 2) (v. § 4) è stato previsto un nuovo sfioratore, con ciglio alla stessa quota dello scarico di superficie esistente (780,75 m s.m.), sopra la struttura ad arco-gravità.

In Figura 10 si può vedere una planimetria della nuova struttura ad arco-gravità estratta dagli elaborati grafici del progetto definitivo (dicembre 2009); si può notare in essa lo sfioratore in fregio alla nuova opera.



**Figura 10**

In Figura 11 è riportata la sezione della struttura ad arco-gravità in asse allo sfioratore, estratta dagli elaborati grafici del progetto definitivo (dicembre 2009).



**Figura 11**

In Tabella 3 sono riportate le principali caratteristiche delle opere (in base alla normativa vigente all'epoca: D.M. 24.03.1982) nella configurazione risultante dal progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009):

Tipo di diga A.b.2 (ad arco-gravità) – D.M. 24.03.1982:

Volume utile di regolazione	42.000	m <sup>3</sup>
Altezza della diga (DM 24.03.1982)	47,50	m
Altezza della diga (L. 584/94)	41,50	m
Quota di massimo invaso	784,33	m s.m.
Quota di massima regolazione	780,75	m s.m.
Quota del piano di coronamento	785,50	m s.m.
Franco	1,17	m
Sviluppo del coronamento	50	m
Spessore dell'arco al coronamento	2	m

Colmo dell'onda di piena $Q_{1000}$	1.187	m <sup>3</sup> /s
Capacità degli scarichi a q. 784,33 m s.m.		
• Scarico di superficie	766	m <sup>3</sup> /s
• Sfiatore in corpo diga	254	m <sup>3</sup> /s
• Scarico intermedio	167	m <sup>3</sup> /s
• Scarico di fondo	10	m <sup>3</sup> /s

**Tabella 3**

#### **4.2. INTEGRAZIONI AL PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO (DICEMBRE 2009) PRESENTATE A MAGGIO 2011**

Con nota prot. 13100 del 02.12.2010 la Direzione Generale per le Dighe chiedeva al Concessionario alcuni chiarimenti in merito al progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009); in ottemperanza a questa prescrizione il Concessionario presentava il documento "Chiarimenti ed elementi aggiuntivi in ottemperanza alla nota della Direzione Generale per le Dighe prot. 13100 del 02.12.2010" che conteneva:

- Descrizione dello stato di fatto.
- Cronistoria degli studi ed indagini eseguite.
- Motivazioni alla base della scelta della nuova struttura ad arco-gravità ed approfondimento di alcuni aspetti progettuali.

In particolare venivano allegati a questo documento:

- "Analisi con modello numerico per la determinazione dello stato tensio-deformativo della diga di Ceppo Morelli" (Cesi Ricerca – marzo 2009): le analisi numeriche della diga esistente precedentemente già allegate al progetto preliminare di adeguamento (marzo 2009).
- "Analisi numeriche a supporto del progetto della nuova diga di Ceppo Morelli" (RSE – maggio 2011): le ultime analisi numeriche della nuova struttura ad arco-gravità con sisma da normativa, mentre invece nel progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009) erano state cautelativamente presentate analisi numeriche considerando un sisma di 1 g. Queste ultime analisi hanno evidenziato risultati pressoché identici alle precedenti, a dimostrazione che l'azione sismica ha scarsa influenza sullo stato tensionale della nuova struttura.
- "Adeguamento della Relazione geologico-geomeccanica" (Prof. Martinotti e Dott. Arese – marzo 2011): adeguamento delle verifiche di stabilità della relazione geologico-geomeccanica del progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009), allora eseguite in base al D.M. 11.03.1988, in ottemperanza al D.M. 14.01.2008. L'esito di questo aggiornamento ha mostrato addirittura un miglioramento dei fattori di sicurezza con la nuova normativa.
- "Aggregati per il calcestruzzo della nuova struttura della diga di Ceppo Morelli – Valutazione della potenziale reattività agli alcali degli aggregati provenienti dall'invaso della diga. Risultati della prima fase di indagini." (ERSE – novembre 2009) - "Aggregati per il calcestruzzo della nuova struttura della diga di Ceppo Morelli – Valutazione della potenziale reattività agli alcali degli aggregati provenienti dall'invaso della diga. Risultati della seconda fase di indagini." (RSE – gennaio 2011):

analisi del potenziale AAR degli aggregati previsti per la nuova struttura ad arco-gravità. Per la nuova struttura ad arco-gravità è previsto l'impiego degli aggregati presenti nell'invaso di Ceppo Morelli, che vengono "da sempre" utilizzati senza alcun problema nell'impianto di confezionamento di Vanzone (della ditta Cogeis S.p.A.). Sono state allegate a queste integrazioni le analisi, a breve e lungo termine, volte a determinare il potenziale di reattività agli alcali di questi aggregati. Le analisi hanno dato tutte esito favorevole, evidenziando la possibilità di impiegare per il confezionamento del calcestruzzo gli aggregati presenti nell'invaso, senza rischiare l'innescarsi di una reazione espansiva del calcestruzzo (AAR).

## **5. INTEGRAZIONI AL PROGETTO DEFINITIVO DI ADEGUAMENTO (DICEMBRE 2009) RICHIESTE DALLA DIREZIONE DIGHE CON NOTA PROT. 4173 DEL 25.03.2013 A SEGUITO DEL VOTO N. 42 DEL 18.12.2012 DELLA IV SEZIONE DEL CONSIGLIO SUPERIORE DEI LAVORI PUBBLICI**

Nell'iter istruttorio del progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009), la Direzione Generale per le Dighe ha chiesto parere alla IV Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che lo ha espresso con il Voto n. 42 del 18.12.2012 in cui venivano richieste integrazioni alla documentazione progettuale.

La Direzione Generale per le Dighe, con nota prot. 4173 del 25.03.2013, chiedeva quindi al Concessionario le integrazioni da produrre, da presentare in un aggiornamento del progetto definitivo.

Il Concessionario, con nota prot. 1274 del 17.06.2013, presentava alla Direzione Generale per le Dighe il programma delle attività che sarebbero state eseguite per integrare il progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009).

Si riportano qui di seguito le prescrizioni della Direzione Generale per le Dighe così come sintetizzate in calce alla nota prot. 4173 del 25.03.2013:

*... il progetto definitivo di nuova costruzione in oggetto dovrà in definitiva essere integrato ed adeguato.*

*L'insieme di dette prescrizioni, sinteticamente, riguardano:*

- *l'adeguamento del franco netto;*
- *un modesto adeguamento della capacità complessiva di scarico della diga, ove non sufficiente il contributo derivante dall'effetto di laminazione esercitato dall'invaso;*
- *per quanto riguarda la configurazione dello scarico di superficie, la necessità di non far sormontare il muro dx di progetto a valle dello scivolo dalla corrente a superficie libera scaricata dal nuovo scarico di superficie per una quota di massimo invaso corrispondente alla portata di massima piena millenaria;*
- *la necessità di valutare in modo più approfondito il funzionamento dello scarico di mezzofondo con opportune modellazioni numeriche, con l'obiettivo di definirne le condizioni di normale esercizio (a pelo libero) e le condizioni di esercizio eccezionali in relazione alle manovre degli organi di intercettazione sullo stesso scarico;*
- *l'approfondimento delle conoscenze sulle caratteristiche geotecniche dell'ammasso di fondazione e del suo assetto strutturale, eventualmente con l'esecuzione di indagini integrative, al fine di definire nel dettaglio la relativa interazione con l'assetto geometrico della nuova struttura;*
- *l'esplicitazione di verifiche geotecniche, con riferimento sia al corpo diga che alle opere complementari;*
- *l'integrazione e l'adeguamento delle verifiche di stabilità riguardanti lo sbarramento con verifiche sismiche, che tengano conto anche dell'interazione dello stesso con la*



struttura esistente e con i sedimenti accumulati nel serbatoio (nell'ipotesi del loro mantenimento); ciò conducendo pure analoghe esplorazioni numeriche da sviluppare con l'approccio di cui allo schema di nuove norme tecniche licenziato dal CSLLPP in data 18.12.2009;

- la modifica del sistema di contatto con la struttura esistente;
- la realizzazione di un nuovo schermo di tenuta;
- un incremento dei lavori di demolizione (taglio) della diga esistente;
- l'aggiornamento dello studio di propagazione dell'onda di piena artificiale per manovre volontarie degli organi di scarico;
- il sistema di monitoraggio.

Con l'adeguamento progettuale dovranno inoltre individuarsi, mediante prove preliminari, le caratteristiche dei materiali da impiegare per la costruzione dello sbarramento murario, da eseguirsi come da Regolamento Dighe. Per le caratteristiche di detti materiali si dovrà tenere conto delle prescrizioni contenute nell'allegata istruttoria. Si ricorda infine che per quanto riguarda lo sviluppo dei calcoli delle opere in c.a., le stesse dovranno essere redatte con il livello di approfondimento necessario per la relativa approvazione ai sensi della L. 584/94 da parte di questa Divisione.

Si riportano quindi qui di seguito le attività integrative presentate dal Concessionario con nota prot. 1274 del 17.06.2013, illustrando per ciascuna di esse cosa è stato eseguito e rimandando per i dettagli alle relazioni specialistiche della presente revisione progettuale.

1. Sarà effettuato l'aggiornamento del Progetto di gestione dell'invaso che terrà conto di quanto richiesto nella Conferenza di servizi del 13 settembre 2012. In particolare il Progetto di gestione, in conformità con il Progetto di adeguamento della diga, prevede l'abbandono dell'esistente scarico di fondo della diga, interrito nel 1939, ed il mantenimento dell'attuale quota dei sedimenti nell'invaso.

*Il documento sarà inviato entro il prossimo mese di ottobre.*

Il Concessionario ha provveduto ad inviare alle Autorità Competenti ed alla Direzione Generale per le Dighe, con nota prot. PU-570 del 03.03.2014, l'ultimo aggiornamento del Progetto di Gestione dell'invaso, che prevede l'abbandono dell'esistente scarico di fondo ed il mantenimento dell'attuale quota dei sedimenti nell'invaso.

2. Il coronamento della nuova diga sarà sopralzato di 30 – 40 cm rispetto alla quota del progetto 2009, per tener conto del richiesto adeguamento del franco netto e del nuovo valore della portata di riferimento (1264 m<sup>3</sup>/s rispetto a 1187 m<sup>3</sup>/s del progetto 2009).

Il nuovo valore dell'onda di piena millenaria di 1.264 m<sup>3</sup>/s, richiesto dalla Direzione Generale per le Dighe durante l'istruttoria di valutazione del progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009), ha imposto l'innalzamento del piano di coronamento per consentire l'evacuazione della nuova portata di piena rispettando il franco regolamentare.

Il piano di coronamento è stato innalzato di 50 cm da 785,50 m s.m. a 786,00 m s.m.

Come dettagliato nella "Relazione idraulica" del presente progetto (v. All. X.03), la nuova quota di massimo invaso è 784,50 m s.m., e a questo livello del serbatoio si hanno le seguenti portate esitate dagli organi di scarico:

- Scarico di superficie esistente + Nuovo scarico di superficie: (v. All. X.04 del presente progetto: "Relazione sulla modellazione idraulica")	1.054,33 m <sup>3</sup> /s
- Scarico intermedio: (v. All. X.03 del presente progetto: "Relazione idraulica", contenente i nuovi abachi delle portate dello scarico intermedio a seguito dei rilievi topografici della galleria)	209,74 m <sup>3</sup> /s
	<hr/> <b>1.264,07 m<sup>3</sup>/s</b>

Come dettagliato nella Relazione idraulica del presente progetto (v. All. X.03), la nuova quota del piano di coronamento rispetta inoltre il franco regolamentare di 1,30 m previsto dalle nuove "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione di sbarramenti di ritenuta" approvate con D. Min. Infrastrutture e Trasporti del 26.06.2014 (NTC Dighe).

3. *Il progetto 2009 tiene già conto delle indicazioni del modello idraulico. Infatti il muro destro del nuovo scarico di superficie in corpo diga era già stato rialzato e profilato a ricciolo nella parte sommitale per evitarne il sormonto in corrispondenza del deflusso della portata massima e si ritiene adeguato anche per la portata di 1264 m<sup>3</sup>/s.*

In base alle risultanze delle prove su modello idraulico eseguite nel 2009 (v. All. X.04 del presente progetto), il progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009) prevedeva già una modifica del muro del nuovo scarico di superficie rispetto alla configurazione del modello idraulico: è infatti stato rialzato e profilato a ricciolo nella parte sommitale per evitarne il sormonto in corrispondenza del deflusso della portata in condizioni di massimo invaso (784,50 m s.m.).

4. *E' stato recentemente eseguito un preciso rilievo morfologico dello scarico di alleggerimento: sulla base di questo saranno rivisti i calcoli idraulici e predisposte tabelle e abachi per la determinazione della portata effluente nelle diverse condizioni di esercizio, al variare dell'invaso e dell'apertura delle paratoie.*

Nell'estate del 2010 il Concessionario ha eseguito una campagna di rilievi topografici della galleria dello scarico intermedio, da questa indagine è emersa una dimensione media della galleria maggiore rispetto a quanto risultasse dai disegni disponibili.

Questi rilievi topografici molto dettagliati (22 sezioni per 61 m di galleria) hanno consentito la valutazione delle precise portate esitabili e, tramite un modello di calcolo, la determinazione delle condizioni di moto della corrente in galleria per differenti livelli del serbatoio e gradi di apertura delle paratoie piane all'imbocco. Nella "Relazione idraulica" del presente progetto (v. All. X.03) sono dettagliate queste analisi eseguite e riportati gli abachi delle portate esitabili da questo scarico

nelle varie condizioni di esercizio. Si riportano qui di seguito i principali risultati emersi da queste verifiche idrauliche:

- la galleria mantiene un funzionamento a pelo libero per qualsiasi livello di invaso con paratoie aperte fino al 75%. Con paratoie completamente aperte il funzionamento a pelo libero è garantito fino a livelli del serbatoio di circa 778,50 m s.m. corrispondenti ad una portata esitabile di circa 170 m<sup>3</sup>/s.
- la portata esitabile in condizioni di massimo invaso (784,50 m s.m.) con paratoie completamente aperte è di 209,74 m<sup>3</sup>/s (con galleria in pressione); valore ben superiore (+25%) rispetto a quanto precedentemente calcolato sulla base dei disegni disponibili della galleria, che fornivano una sagoma decisamente inferiore rispetto a quella recentemente rilevata.

5. *Per approfondire le conoscenze della roccia di imposta della diga proponiamo di effettuare due sondaggi esplorativi, in corrispondenza delle due spalle della diga. I sondaggi saranno realizzati a partire dal coronamento e si approfondiranno fino a circa 10 metri al di sotto della quota minima di fondazione.*

Tra novembre 2014 e gennaio 2015 è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche volta all'approfondimento delle conoscenze della roccia di imposta. Queste indagini sono consistite nell'esecuzione di 2 sondaggi a carotaggio continuo, di circa 65 m di lunghezza ciascuno, lungo le imposte sinistra (sondaggio S2) e destra (sondaggio S1) della nuova struttura ad arco-gravità, fino a quasi 20 m di profondità oltre il punto più depresso delle sue fondazioni.

All'interno dei fori dei sondaggi sono state eseguite prove di permeabilità Lugeon e soprattutto video ispezioni con scansione ottica (OBHTV) e acustica (BHTV).

Nella "Relazione geologico-geomeccanica" del presente progetto (v. All. X.02) sono dettagliate e analizzate queste indagini, di cui è allegato anche il rapporto finale. In base ad esse lo studio geologico-geomeccanico dell'imposta della nuova struttura ad arco-gravità, coordinato dal Prof. Martinotti e dal Dott. Arese, è stato approfondito ed integrato, grazie anche ad ulteriori rilievi geologici di campo.

Da questi approfondimenti emerge in estrema sintesi:

- L'ottima qualità dell'ammasso roccioso.
- La stabilità dei versanti è verificata nelle condizioni più gravose (statiche e sismiche), fatta eccezione per un cuneo potenzialmente instabile in sponda destra di cui è stata prevista la rimozione in progetto.
- Le modeste spinte esercitate dalla nuova diga sulla roccia di imposta, nelle condizioni più gravose (statiche e sismiche), sono ininfluenti in relazione ai parametri geomeccanici della roccia.
- L'ultima campagna di indagine ha consentito di verificare che l'ammasso roccioso si presenta decisamente chiuso con fratture aperte (di pochi mm) spaziate di circa 10 m, con un'unica faglia osservata seppur senza zona di danneggiamento, ma con patine di ossidazione, nel sondaggio S2 tra 9,60 e 10,60 m. Tuttavia sono state eseguite comunque prove Lugeon nei fori dei sondaggi, non per determinare la permeabilità dell'ammasso, ritenuta con

sufficiente cautela del tutto impermeabile, ma per valutare l'assorbimento di acqua all'interno delle principali discontinuità rilevate, in relazione al variare della pressione di iniezione.

Sulla base dei risultati ottenuti si può affermare che:

- le discontinuità o le zone fratturate ubicate in corrispondenza della maggior parte delle prove Lugeon effettuate sono praticamente impermeabili;
- solamente 3 discontinuità (una in S1 e due in S2) presentano assorbimenti da modesti a medi;
- alcune prove Lugeon, specialmente a fondo foro, evidenziano una modesta fratturazione idraulica per  $P > 0,6 \div 0,8$  MPa.

In riferimento a quanto sopra riportato non si ritiene necessaria la realizzazione di uno schermo di impermeabilizzazione. Iniezioni in pressione anziché "cucire" l'ammasso roccioso, già impermeabile di suo, potrebbero generare fratturazione idraulica, peggiorando le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso stesso.

Viceversa, durante l'esecuzione delle iniziali fasi di pulizia dei versanti, si valuterà con attenzione il quadro fessurativo e si prenderà in esame la possibilità di iniettare solo le eventuali fratture aperte.

Per quanto riguarda le opere complementari, riferendosi allo scarico di superficie esistente, come descritto in precedenza, è stata già eseguita una serie di sondaggi volta ad individuare la roccia di imposta su cui potere fondare i nuovi getti del sovrizzo del muro di valle. Nella "Relazione di calcolo" del presente progetto (v. All. X.06) sono riportate le verifiche aggiornate di questo muro nella nuova configurazione progettuale.

6. *Per quanto riguarda la stabilità della spalla sinistra, sarà effettuata l'analisi dei potenziali cinematismi individuati dallo studio geomeccanico del 2009, utilizzando come dati di input per le verifiche i nuovi dati geomeccanici che si otterranno dalle indagini di cui al punto 5 e le spinte che la diga eserciterà sull'ammasso roccioso (determinate come indicato al successivo punto 9).*

Grazie alle nuove analisi strutturali ad elementi finiti della struttura ad arco-gravità è stato possibile approfondire le massime sollecitazioni, in termini di modulo e direzione, esercitate da quest'ultima sull'ammasso roccioso di imposta; in base a questi dati l'equipe del Prof. Martinotti e del Dott. Arese ha potuto verificare positivamente i potenziali cinematismi individuati in sponda sinistra, come dettagliato nella "Relazione geologico-geomeccanica" del presente progetto (v. All. X.02).

7. *Sarà approfondita la possibile interazione fra la nuova struttura e l'esistente adottando i modelli già disponibili per le due dighe, secondo lo schema seguente:*
  - *Nel modello della diga esistente sarà applicato un carico pari al peso della diga da realizzare lungo l'impronta occupata dalla diga stessa; in tal modo si potrà valutare l'eventuale spostamento verso valle dell'opera esistente causato dalla costruzione della nuova diga.*

- Con il modello esistente della diga nuova si determinerà lo spostamento in direzione monte-valle della nuova struttura soggetta al solo peso proprio.
- Dall'analisi comparativa dei risultati ottenuti con i due modelli sarà possibile effettuare una stima della potenziale interazione tra le due strutture.

In realtà questi studi sono stati maggiormente approfonditi rispetto a quanto sopra indicato dal Concessionario; infatti RSE S.p.A. ha eseguito un unico modello ad elementi finiti di entrambi gli sbarramenti e della roccia di imposta, come si può vedere nelle "Analisi numeriche a supporto della progettazione della nuova diga di Ceppo Morelli" (v. All. X.05 del presente progetto), commentate nella "Relazione generale" (v. All. X.01 del presente progetto).

In questo modello è stata simulata per fasi la costruzione della nuova diga verificando mano a mano le interazioni tra le due strutture. Nel modello sono state inoltre introdotte due superfici, una sul paramento di valle della diga esistente e una sul paramento di monte di quella di nuova costruzione, ad una distanza reciproca iniziale di 2 cm, al fine di valutarne l'avvicinamento e le eventuali pressioni di contatto.

Dai risultati emerge che non si verificano contatti tra la nuova diga e quella esistente, né durante la costruzione, né in esercizio sotto i carichi statici e sismici: le pressioni sulle superfici di contatto sono sempre nulli.

Il massimo avvicinamento risulta nella combinazione di carico sismica con carico termico estivo (combinazione 4.1 di Tabella 6 dell'All. X.05), per la quale risulta un avvicinamento dei due paramenti di poco superiore al millimetro.

8. Per quanto riguarda "gli aspetti connessi con il calore di idratazione del calcestruzzo e del relativo smaltimento in connessione con l'avanzamento dei getti", si effettuerà uno studio modellistico che terrà conto dell'effettiva costruzione per fasi della struttura. Per i parametri termici e meccanici da adottare nelle analisi si farà riferimento prevalentemente ai dati di letteratura.

Per studiare gli aspetti connessi con il calore di idratazione dei getti della nuova struttura, è stato realizzato da RSE S.p.A. un modello ad elementi finiti (v. All. X.05 del presente progetto) comprendente la diga esistente, la nuova struttura ad arco-gravità e l'ammasso roccioso di imposta; la mesh di questo modello è più fitta rispetto a quella del modello del precedente punto 7 per potere rappresentare tutti i singoli strati di getto di ciascun concio.

Per i parametri termici si è fatto riferimento agli studi, condotti da Enel-Cris, per la determinazione del calore di idratazione del calcestruzzo della diga di Stropo, la cui composizione è pressoché identica a quella prevista per i getti massivi della nuova struttura ad arco-gravità (Miscela M), come si può constatare dalle tabelle di seguito riportate:

*Stropo*

Leganti	Cemento Portland 325	105	kg
---------	----------------------	-----	----

	Ceneri volanti	45	kg
Acqua		120	kg
Aggregati	(inclusi ulteriori 59 kg di ceneri volanti)	2180	kg
Peso teorico dell'impasto		2.450	kg

*Ceppo Morelli (Miscela M)*

Leganti	Cemento tipo IV B 32,5 R	100	kg
	Ceneri volanti	100	kg
Acqua		120	kg
Aggregati	0÷3 mm	520	kg
	3÷15 mm	610	kg
	15÷30 mm	410	kg
	30÷80 mm	560	kg
Peso teorico dell'impasto		2.420	kg

Proprio per limitare al massimo le tensioni indotte dallo smaltimento del calore di idratazione, non si ritiene di dover migliorare le caratteristiche del calcestruzzo di massa M ( $R_{ck} = 15 \text{ MPa}$ ) che deve sopportare uno stato di sollecitazione molto contenuto.

In sede di progettazione esecutiva della nuova struttura ad arco-gravità, verranno eseguite prove di laboratorio sulle miscele di calcestruzzo previste e per la miscela M anche quelle volte alla determinazione del calore di idratazione; qualora i risultati di queste prove evidenziassero valori termici significativamente maggiori rispetto a quelli oggi assunti, le analisi ad elementi finiti verranno ripetute.

I risultati del modello numerico mostrano che la formazione di un nucleo caldo dovuto allo sviluppo del calore di idratazione nei getti si manifesta soprattutto nella parte medio-bassa della struttura, dove lo spessore è maggiore e dove è presente lo sfioratore massiccio in corpo diga.

In termini di sollecitazioni, risultano zone di trazione nella parte medio-bassa del paramento di valle, che non appaiono preoccupanti, sia in quanto si verificano in una zona corticale, dove la nuova diga sarà armata, sia poiché sono legate alle singolarità geometriche della struttura, modellata come monolitica e con un comportamento elastico-lineare dei materiali. Gli sforzi di compressione, durante tutta la costruzione, assumono valori modesti.

In generale, a commento dei risultati ottenuti, si evidenzia come i risultati di questa modellazione da un lato risentono dell'assenza nel modello geometrico del giunto di fondazione e (soprattutto) del giunto costruttivo tra il paramento di valle della diga



e lo sfioratore massiccio (non modellati per esigenze di semplificazione della simulazione); dall'altro lato mostrano che le direzioni di tali trazioni sono sostanzialmente ortogonali al piano dei giunti non modellati, quindi il loro valore sarebbe notevolmente ridotto, se non addirittura annullato, se venissero inseriti nel modello. Inoltre, la sequenza temporale dei getti adottata per queste analisi è molto cautelativa in quanto prevede tempi accelerati rispetto a quanto previsto nel programma dei lavori di progetto.

In definitiva, l'analisi dei risultati della modellazione ad elementi finiti degli effetti legati al calore di idratazione del calcestruzzo durante la costruzione della nuova diga, porta a concludere che nel corpo diga non si generano trazioni tali da innescare stati fessurativi.

9. *Nella revisione delle analisi si terrà prudenzialmente conto anche della spinta esercitata dai sedimenti direttamente sulla diga di nuova realizzazione (comprendendo anche le azioni inerziali indotte dall'azione sismica) ipotizzando che nel lungo periodo la struttura esistente non sia più in grado di far fronte a tale spinta.*

*Si qualificherà l'entità delle spinte - in termini di modulo e direzione - trasmesse dalla diga all'ammasso roccioso nelle diverse condizioni di carico (esercizio e sismiche).*

*Per quanto riguarda le analisi sismiche evidenziamo le seguenti considerazioni:*

- *Nella relazione di calcolo, con riferimento allo stato limite di collasso SLC, è stata considerata una accelerazione pari a 0,342 g per le azioni sismiche orizzontali e 0,165 g per quella verticale; i valori delle sollecitazioni indotte sono risultati molto modesti.*
- *Tenendo conto che la parte superiore dei giunti di costruzione non sarà iniettata, si può ragionevolmente ritenere che il comportamento della struttura sarà più prossimo a quello di una diga a gravità piuttosto che ad arco-gravità. Ciò comporta che il comportamento dinamico della struttura è sostanzialmente definito dal primo modo di vibrare (tipicamente si tratta di un "modo di mensola") e pertanto si ritiene che i modi superiori (ai quali nella nota del C.S.LL.PP. si attribuisce la possibilità che si possano manifestare effetti locali deformativi che solo una verifica dinamica può evidenziare) non dovrebbero avere una particolare influenza sul comportamento dinamico complessivo. Riteniamo pertanto adeguati i calcoli già eseguiti.*

Per quanto riguarda l'entità delle spinte sull'ammasso roccioso, è stato utilizzato il modello numerico delle due dighe, già utilizzato per gli approfondimenti sull'avvicinamento delle due strutture di cui al precedente punto 7., nel quale si è introdotto anche il giunto roccia-calcestruzzo, al fine di calcolare le pressioni sulla superficie di contatto (v. All. X.05 del presente progetto). Le pressioni massime che la diga di nuova costruzione esercita sulla roccia di fondazione risultano mediamente dell'ordine di 0,5 MPa.

Nonostante il Concessionario ritenesse adeguati i calcoli già eseguiti, ha poi comunque deciso di eseguire una approfondita analisi strutturale, statica e sismica, della nuova struttura ad arco-gravità soggetta sia alla spinta idrostatica che alla

spinta dei sedimenti presenti nel serbatoio. Per fare questo RSE S.p.A. ha realizzato un modello ad elementi finiti della sola nuova struttura e della sua roccia di imposta (v. All. X.05 del presente progetto).

Queste analisi numeriche sono state condotte in ottemperanza alle "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)", di cui al D.M. 26.06.2014. Per i criteri di verifica si è fatto inoltre riferimento ai documenti pubblicati da US Army Corps of Engineers (USACE) per l'analisi sismica del proprio parco dighe.

Le analisi statiche sono del tutto in linea con i risultati ottenuti nelle precedenti analisi strutturali allegata al progetto definitivo 2009 ed alle integrazioni del 2011.

In condizioni statiche, la zona sovrassollecitata a trazione al paramento di valle, imputabile essenzialmente al carico termico, è del tutto accettabile: in primo luogo in quanto tali trazioni risultano corticali e quindi assorbibili dall'armatura prevista; in secondo luogo in quanto tra il paramento di valle della diga e lo sfioratore massiccio è prevista la realizzazione di un giunto (non modellato nel reticolo di calcolo) che renderà trascurabile il valore di tali trazioni. Al paramento di monte le condizioni di verifica sono sempre soddisfatte. Gli sforzi di compressione sono ampiamente entro i limiti in tutta la diga per ogni combinazione.

Le sollecitazioni risultanti dall'applicazione delle azioni sismiche risultano di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle generate dalle coazioni termiche.

In conclusione, le verifiche di sicurezza della nuova diga, in condizioni statiche e sismiche, sono soddisfatte.

*10. Verrà semplificato il sistema di contatto fra la nuova diga e quella esistente mantenendo comunque un giunto di separazione fra le due strutture.*

Mediante il modello ad elementi finiti comprendente entrambe le dighe di cui al precedente punto 7 sono stati studiati in condizioni statiche e sismiche gli avvicinamenti tra i due sbarramenti. Il massimo avvicinamento tra le due strutture, in condizioni sismiche, è risultato circa 1 mm. Nel progetto definitivo di adeguamento (dicembre 2009) l'avvicinamento era risultato maggiore, circa 1 cm, perché non si disponeva di un modello complessivo di entrambi gli sbarramenti, bensì si erano sommati i moduli dei massimi spostamenti delle singole opere, inoltre si era considerato un irrealistico sisma di intensità pari a 1 g.

Un avvicinamento massimo così modesto fra le due strutture ha portato alla decisione di semplificare e ridurre il sistema di separazione tra le stesse. Si è infatti deciso di adottare uno strato di EPDM di 2 cm di spessore avente una densità di 200 kg/m<sup>3</sup>. L'EPDM (Etilene Propilene Diene Monomero) è un polimero sintetico a celle chiuse abitualmente impiegato per guarnizioni; esso ha il vantaggio di non consentire il passaggio di acqua al suo interno (impermeabile), di essere deformabile ma allo stesso tempo di comprimersi poco (< 2 mm) sotto il carico di uno strato di 2 m di calcestruzzo fresco, di non alterarsi chimicamente a contatto con il calcestruzzo, e di mantenere le sue proprietà meccaniche in ambienti tra

-40°C e +95°C.

Inoltre risulta molto semplice da mettere in opera, in quanto le lastre di EPDM possono essere fornite con uno strato adesivo per il loro fissaggio temporaneo al paramento di valle della diga esistente durante le fasi di getto della nuova. Ovviamente la posa dell'EPDM sarà preceduta da una perfetta pulizia con getti di acqua e aria in pressione del vecchio calcestruzzo.

In prossimità delle imposte rocciose della diga l'elemento di separazione (EPDM) si interrompe. Per garantire la perfetta solidarizzazione della nuova diga all'imposta, sia con la struttura esistente che con la roccia, è stata prevista la messa in opera negli ultimi 3÷4 m a cavallo tra la diga esistente e l'imposta rocciosa (1,5÷2 m per parte), preventiva ai getti della nuova diga, di un adesivo epossidico bicomponente. L'applicazione di questo prodotto sarà ovviamente preceduta dalla perfetta pulizia e scarifica con getti di acqua e aria in pressione sia del vecchio calcestruzzo che della roccia.

Verso valle poi le restanti fondazioni e imposte della nuova struttura verranno drenate a gravità verso il cunicolo ispezionabile a quota 745 m s.m. e di qui scaricate a valle (con clapet di non ritorno).

Al termine dei lavori pertanto la tenuta del serbatoio sarà assicurata, come oggi dall'ottima impermeabilità della roccia di fondazione, già trattata a suo tempo con iniezioni.

Inoltre, in ottemperanza alle conclusioni degli ultimi approfondimenti geologici (v. All. X.02), durante le iniziali fasi di pulizia dei versanti verrà valutata con attenzione anche la possibilità di iniettare solo le eventuali fratture aperte rilevate.

Nel progetto definitivo del 2009 era stata prevista una membrana impermeabilizzante a spruzzo non perché non ci si fidasse della tenuta del solo calcestruzzo della nuova diga, ma semplicemente per il modesto onere che questo dispositivo comportava utilizzando la diga esistente come cassero.

La semplificazione del sistema di contatto tra le due dighe non prevede più l'impiego di questa membrana. Nonostante la miscela M del calcestruzzo della nuova diga abbia caratteristiche sufficienti a garantire, da sola, una adeguata impermeabilità della struttura, si è comunque previsto di utilizzare nell'ultimo metro di spessore della nuova diga a ridosso del paramento di monte, e quindi a contatto con l'EPDM, la miscela M\*, più ricca di legante essendo ottenuta privando la miscela M dell'ultima classe di inerti (30÷80 mm). Questa scelta è finalizzata a preservare lo strato di separazione in EPDM, evitando di gettare contro di esso una miscela con inerti di classe 30÷80 mm. Inoltre questa scelta garantisce maggiormente la tenuta del paramento di monte della nuova opera, soluzione già utilizzata in passato con questa finalità per altre dighe esistenti.

- 11. Sulla base dei risultati delle indagini nella roccia di fondazione (punto 5), con particolare riferimento alle caratteristiche di impermeabilità ed iniettabilità, sarà valutata la fattibilità di uno schermo di tenuta al piede di monte della nuova diga.*

Grazie agli esiti dell'ultima campagna di indagini geognostiche, l'equipe del Prof. Martinotti e del Dott. Arese nella "Relazione geologico-geomeccanica" del presente progetto (v. All. X.02) evidenzia (v. precedente punto 5.) come l'ammasso roccioso si presenti decisamente chiuso e risulti con sufficiente cautela del tutto impermeabile. Inoltre gli approfondimenti e le prove eseguite hanno portato alla convinzione che un nuovo schermo di impermeabilizzazione mediante iniezioni non solo non è necessario, ma addirittura anziché "cucire" l'ammasso roccioso, già impermeabile di suo, potrebbe generare fratturazione idraulica peggiorando le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso stesso.

Verrà invece valutato con attenzione, durante le iniziali fasi di pulizia dei versanti, il quadro fessurativo e si prenderà in esame la possibilità di iniettare solo le eventuali fratture aperte.

12. *Si ritiene ininfluyente "un incremento dei lavori di demolizione" della diga esistente fino alla quota attuale dei sedimenti, che risulterebbe di pochi metri. L'interazione fra la nuova struttura e la restante porzione di quella esistente sarà comunque verificata come indicato al punto 7.*

Il progetto definitivo di adeguamento prevede già la quasi totale demolizione della diga esistente sopra la quota dei sedimenti. Infatti la diga viene demolita per la quasi totalità fino a 775 m s.m., solo 2 m sopra il livello medio dei sedimenti (circa 773 m s.m.); vengono inoltre demolite le spalle della struttura esistente per consentire di potere impostare i getti di quelle del nuovo sbarramento.

In definitiva della diga esistente rimangono solamente due tratti di arco alle reni aventi uno sviluppo di soli 8 m ciascuno. Si è previsto di lasciare queste piccole porzioni della diga esistente in quanto esse sono collegate alle strutture di imbocco degli scarichi di fondo e intermedio esistenti. Pertanto la loro rimozione sarebbe molto delicata e difficile anche perché comporterebbe il parziale fuori esercizio dello scarico intermedio, rendendo così impossibile la gestione delle portate in ingresso al serbatoio durante l'ultima fase di costruzione del nuovo sbarramento.

Inoltre i risultati delle analisi strutturali precedentemente descritte, hanno evidenziato l'assenza di interazione fra le due dighe, dimostrando l'assoluta ininfluenza per la nuova struttura ad arco-gravità del mantenimento di queste due piccole mensole di calcestruzzo alle reni della diga esistente.

13. *L'aggiornamento dello studio di propagazione dell'onda di piena artificiale per le manovre volontarie degli scarichi sarà effettuato non appena sarà approvato il progetto definitivo di adeguamento della diga.*

L'approvazione del progetto definitivo di adeguamento, e quindi la conseguente ufficializzazione del dimensionamento dei nuovi scarichi profondi (fondo e DMV), consentirà l'aggiornamento dello studio di propagazione delle onde di piena artificiali per manovre volontarie degli organi di scarico.

14. Nel progetto non è stato inserito un sistema di collimazione sul coronamento della nuova diga per i seguenti motivi:

- Non è disponibile nella nuova diga una sezione di misura significativa su cui ubicare il caposaldo di misura in quanto l'intera porzione centrale della struttura è occupata dallo scarico di superficie.
- La topografia dei luoghi non consente di individuare, nelle vicinanze della diga, punti fissi su cui posizionare i caposaldi di riferimento (le attuali mire fisse sono ubicate sulla muratura della cabina dello scarico di fondo).

Riteniamo comunque che il previsto nuovo pendolo nella sezione maestra possa efficacemente monitorare gli spostamenti planimetrici della diga.

Saranno invece installate all'interno del corpo murario ulteriori nuove celle termometriche per seguire lo sviluppo del calore di idratazione durante la fase costruttiva.

Come sistema di monitoraggio della nuova struttura ad arco-gravità si è previsto in progetto di installare:

- Un pendolo diritto automatico in asse diga nell'apposito pozzo, in sostituzione delle misure di collimazione. Queste infatti non possono controllare la sezione in chiave della diga per la presenza dello sfioratore. Oltre alle misure automatiche, si disporrà anche una postazione per le misure manuali di controllo. Rispetto alla precedente (dicembre 2009), in questa revisione progettuale è stato modificato il sistema di accesso alla camera del pendolo e al suo fulcro, prevedendo un sistema di scale più agevole sia per l'esercizio ordinario che per eventuali futuri interventi di manutenzione, che consente anche di raggiungere la galleria di drenaggio.
- Una linea di livellazione a coronamento che partendo dalla roccia affiorante in sponda destra controlli 6 punti caratteristici della nuova struttura: 2 punti della diga in vicinanza dei muri d'ala dello scarico di superficie e 2 punti a cavallo dei giunti sia in destra che in sinistra.
- Tre piezometri in fondazione per il controllo delle sottopressioni al contatto roccia-calcestruzzo.
- Quattro termometri nel calcestruzzo in corrispondenza del giunto di costruzione in spalla destra; due in più rispetto a quanto previsto nella precedente revisione progettuale (dicembre 2009).
- Sistema di misura delle eventuali perdite nella galleria di drenaggio.

Per maggiori dettagli in merito al sistema di monitoraggio si rimanda alla Relazione generale (v. All. X.01) ed ai disegni (v. All. Y) del presente progetto.

15. Il Progetto sarà inoltre integrato tenendo conto anche degli ulteriori approfondimenti richiesti. In particolare:

- Il canale sfioratore sarà verificato senza considerare il contributo del terreno di rinfianco.
- Le strutture accessorie (muro di valle dello scarico di superficie esistente, muri

*laterali dello scarico di superficie in corpo diga, ponti di servizio pedonali) saranno calcolate considerando una vita utile di 100 anni in conformità con la diga.*

Nella Relazione di calcolo del presente progetto (v. All. X.06) sono riportate le verifiche strutturali in condizioni statiche e sismiche delle strutture accessorie, affinate ed aggiornate considerando una vita utile di 100 anni e una classe d'uso IV, in conformità con la diga; il muro di valle dello scarico di superficie esistente è stato inoltre verificato senza considerare il contributo del terreno di rinfianco.

Come si può vedere dalla relazione specialistica di progetto (v. All. X.06) tutte le verifiche risultano soddisfatte.

Il presente progetto, sviluppato a livello definitivo, contiene tutte le verifiche strutturali delle opere in c.a. e in carpenterie metalliche, mentre invece i disegni contengono solamente le armature tipo. I disegni di dettaglio dei c.a., con il dettaglio delle lunghezze dei ferri di armatura, saranno a corredo del progetto esecutivo.

Dott. Ing. Carlo Claudio MARCELLO

