

Diga di Beauregard: interventi di messa in sicurezza e adeguamento delle opere

L. Artaz, G. Canella,
CVA Compagnia Valdostana delle Acque S.P.A., Aosta, Italy

G. Martinotti
Consultant, Boves (CN), Italy

C. Marcello, P. Meda
ING. C. MARCELLO S.R.L., Milan, Italy

A. Frigerio, G. Mazzà
RSE - Ricerca sul Sistema Energetico S.P.A., Milan, Italy

ABSTRACT: The paper describes the Beauregard dam (Italy) case-history, a concrete arch-gravity structure 132m high, built between 1951 and 1960 on the Dora di Valgrisenche River. The geological and geotechnical investigations carried out since the dam construction have underlined a Deep-Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) on the left slope. Since the first fillings, the interaction between the DSGSD and the dam was recognized to have relevant implications on the dam structural safety. The investigations, which include a detailed analysis and thorough interpretation of the monitoring data over a time span of more than 50 years, have allowed to gain insights into the understanding of the interaction between DSGSD and the dam. The interpretation of the effects of the slide movements against the dam, the forecast of the future possible trends, and the choice of the design solution to guarantee the long-term safety operation of the dam - consisting in the demolition by blasting of the upper part of the structure in order to drastically avoid the foreseen occurrence of large deformations and displacements in the dam body associated to the DSGSD movement - have been performed making resort to complex numerical modelling activities.

KEYWORDS: dam, sliding, forecasting, demolition, blasting, numerical modelling / diga, movimento di versante, demolizione, blasting, modellazione numerica

1 INTRODUZIONE

1.1 Informazioni principali

La diga di Beauregard (Fig. 1), completata nel 1958, è stata gestita da ENEL fino al 2001 quando l'intero schema è stato poi acquisito da CVA (Compagnia Valdostana delle Acque).



Figure 1. Aerial view of the dam located in the Valgrisenche Valley / Vista aerea della diga in Valgrisanche.

Già dai primi invasi la diga aveva manifestato problemi causati da un movimento del versante sini-

stro (Deep Seated Gravitational Slope Deformation, DSGSD). La superficie coperta dal movimento del versante è di circa 6km² e l'estensione in elevazione raggiunge 1000m, (Fig. 2).



Figure 2. Aerial view of the DSGSD affecting Beauregard Dam / Vista aerea della DSGSD che influenza il comportamento della diga di Beauregard.

Purtroppo il fenomeno non fu compreso al momento della progettazione e costruzione.

La DSGSD è composta da complessi metamorfici, nella parte alta anche calcescisti e marmi. La storia tettonica è piuttosto complessa: sono presenti almeno tre fasi di piegatura duttile e taglio, seguito da una sequenza di eventi fragili che hanno prodotto il tipo di frattura osservato, (Barla et Al. 2006). Tutti questi elementi rappresentano fattori chiave che hanno condizionato l'evoluzione della DSGSD, con diversa importanza spaziale e temporale.

Gli studi geologici, strutturali e geomorfologici di dettaglio mostrano chiaramente che il movimento non ha mai chiuso la valle e che il fronte attualmente esposto rappresenta l'espansione massima raggiunta, (Fig. 3). La componente totale del movimento è di circa 100m, come dimostrato anche dall'offset dei confini litologici nella parte superiore della DSGSD e dai rilievi della galleria scavata durante la costruzione.

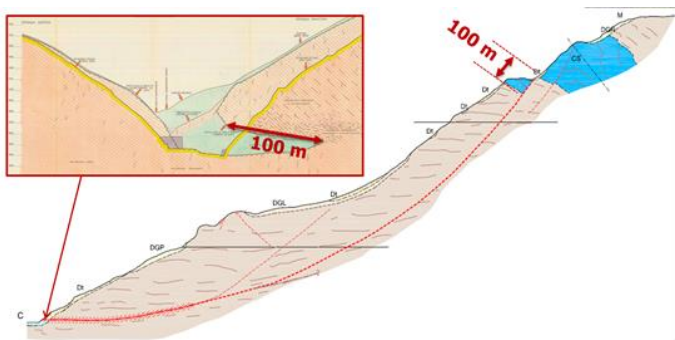


Figure 3. Cross section showing the total displacement of the Beauregard DSGSD / Sezione verticale della DSGSD che mostra lo spostamento totale del versante.

La DSGSD di Beauregard è un fenomeno classico nel contesto geologico della Valle d'Aosta: la sua evoluzione è riconducibile al Last Glacial Maximum (12.000 BP), favorita dalla presenza di zone con basso angolo di taglio, in cui le acque fredde subglaciali hanno agito in modo evidente come agenti emollienti della roccia. La riattivazione del modello di giunzione naturale e delle superfici tettoniche (foliazione, piani SC, zone di taglio) rappresenta il confine geometrico del movimento.

L'entità dello spostamento è compatibile con il tempo geologico e con le velocità oggi. Per il futuro non si prevede un diverso comportamento di questo fenomeno di lunga durata.

Fin dalla costruzione della diga è stata avviata una notevole attività di monitoraggio. Tutti i set complementari di misure (cinque pendoli in prossimità della sponda sinistra della diga, a quota 1.635m; strumentazione topografica; monitoraggio attraverso un sistema GPS della fascia intermedia della DSGSD, da quota 2.200m a 2.400m) hanno rivelato un movimento lento e praticamente costante del versante sinistro nel corso degli anni che varia secondo i punti di riferimento, da 3 a 10 mm / anno.

La Figura 4 mostra la distribuzione degli spostamenti orizzontali misurati dai pendoli installati nella

DSGSD in prossimità della sponda sinistra della diga.

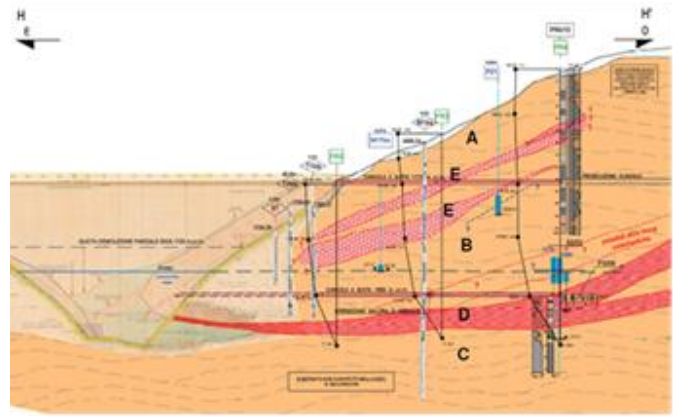


Figure 4. Horizontal displacement distribution along the plumb-lines installed in the DSGSD close to the dam / Andamento degli spostamenti orizzontali misurati dai pendoli installati nella DSGSD posti in prossimità della diga.

2 EFFETTI DELLA DSGSD SULLA DIGA E PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO FUTURO

L'evoluzione del quadro fessurativo osservato sulla diga, in particolare sul paramento di valle, (Fig. 5), è sempre stato coerente con i movimenti del versante. Per limitare lo stato tensionale e deformativo della diga, dal 1965 il livello dell'invaso è stato ridotto in una prima fase da quota 1770m a 1730m e successivamente a 1710m, corrispondente ad una capacità del serbatoio di $7Mm^3$ pari a circa 1/10 del volume di progetto.

Nonostante questa limitazione, la produzione di energia non è mai stata limitata in misura significativa.



Figure 5. View of the main cracks on the downstream face of the dams / Vista delle principali fessure sul paramento di valle della diga.

Al fine di migliorare la comprensione dei fenomeni in atto e dei loro effetti sul comportamento della diga, è stato realizzato un modello numerico, progressivamente aggiornato e integrato nel grado di complessità. In sintesi, i principali obiettivi del modello numerico sono stati:

- interpretazione del comportamento della diga, messo in evidenza fin dai primi invasi, attraverso

so la calibrazione dei parametri meccanici del sistema diga-fondazione-versante;

- previsione del futuro comportamento della diga a breve-medio termine adottando il modello calibrato;
- supporto al progettista per l'analisi delle possibili soluzioni per garantire il funzionamento a lungo termine della diga.

La Figura 6 mostra il modello FEM 3D della diga e di una porzione adeguata del blocco di fondazione. Nel modello si è inclusa una porzione del versante in movimento e la superficie sede dello scorrimento oltre alle principali discontinuità strutturali (giunti e interfacce diga pulvino e pulvino roccia di fondazione).

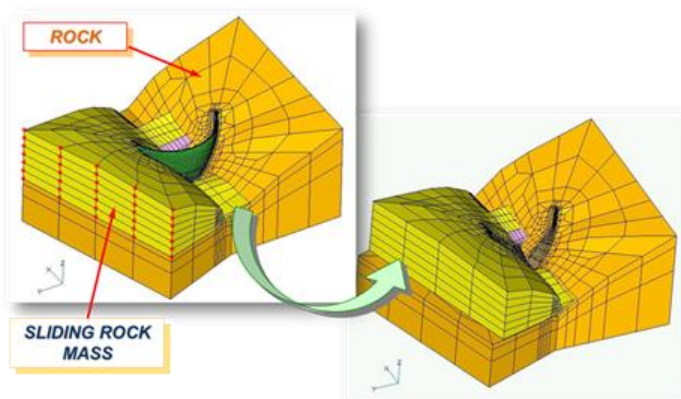


Figure 6. Finite Element mesh of the dam and the surrounding rock mass / Modello FEM della diga e della fondazione.

I nodi in cui sono stati imposti i movimenti della DSGSD sono indicati con punti rossi in figura. Per la fondazione è stata assunta una legge costitutiva isotropa elastico lineare; per il calcestruzzo si è assunto il legame costitutivo *Concrete Damaged Plasticity* (Fenves & Lee 1998); per la DSGSD è stato adottato un legame costitutivo Mohr-Coulomb.

Il processo di identificazione si è basato principalmente su:

- spostamenti misurati lungo il coronamento della diga, (Fig. 7);
- dati di monitoraggio di due pendoli posti all'interno del corpo diga nella sezione principale e nel quarto blocco verso la spalla sinistra;
- quadro fessurativo della struttura come determinato dalle indagini tomografiche, (Fig. 8, da confrontare con Fig. 4).

Successivamente, il modello numerico identificato è stato usato per predire il futuro comportamento della struttura considerando un aumento continuo del movimento di versante con riferimento all'andamento previsto sulla base del comportamento passato. La questione chiave delle analisi è stata quella di valutare se la diga potrebbe subire fenomeni di instabilità locali o globali (*snap-back*).

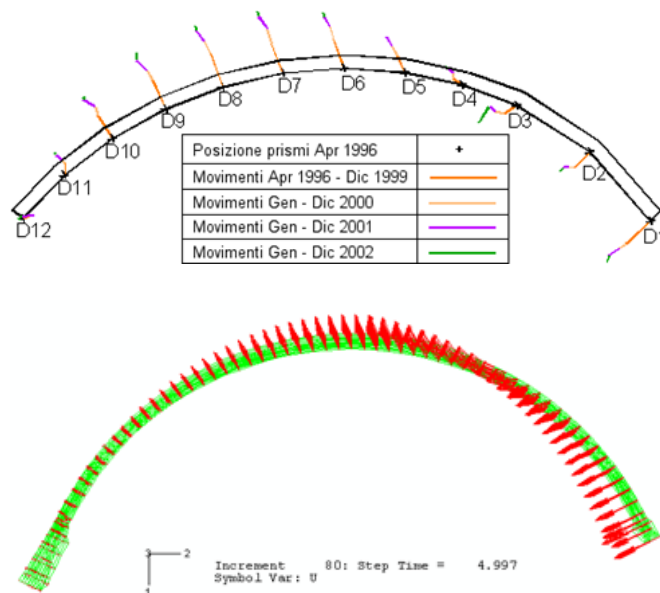


Figure 7. Deformation of the dam crest: (up) based on monitoring; (down) based on computations / Deformazione del coronamento: (alto) valori monitorati; (basso) valori calcolati.

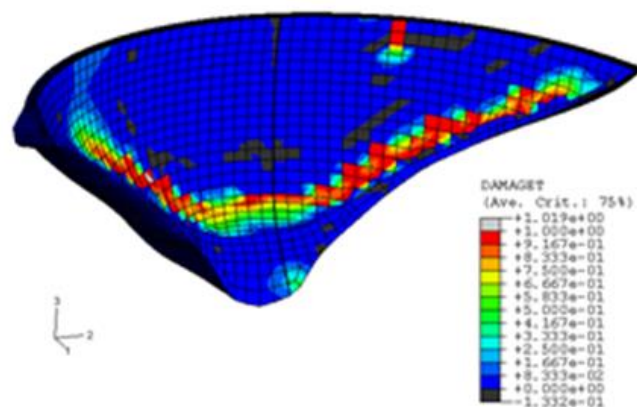


Figure 8. Aerial view of the DSGSD affecting Beauregard Dam / Le didascalie saranno scritte sia in Inglese che in Italiano.

I risultati delle analisi, sintetizzati in Fig. 9, consentono di escludere instabilità per *snap-back* dell'intera a struttura - diga e "pulvino" - perché oltre il valore di picco la forza di reazione sulla sezione maestra della diga diminuisce man mano che il movimento franoso progredisce, evidenziandosi quindi l'attivazione di un comportamento *softening* della struttura.

Tuttavia, lo spostamento verso monte del punto centrale della diga al coronamento (circa 0.21m nel 2010) è piuttosto prossimo allo spostamento corrispondente al valore di picco della forza di reazione che la struttura è in grado di sopportare. Ciò significa che lo stato tensionale e deformativo del sistema è prossimo a raggiungere la fase di *softening* per la quale sarebbero da attendersi grandi spostamenti e deformazioni, in particolare per la parte superiore della struttura.

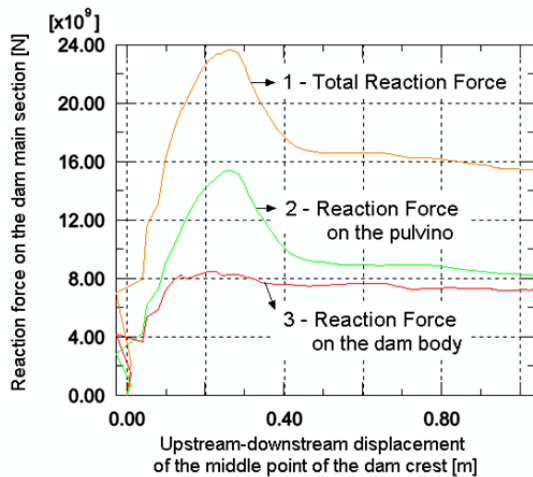


Figure 9. Reaction force on the main cross section of the dam vs the upstream-downstream displacement of the middle point of the crest dam / Forza di reazione sulla sezione maestra della diga in funzione dello spostamento monte-valle nel punto centrale del coronamento.

3 I LAVORI DI RIABILITAZIONE

Considerando la progressione inevitabile degli effetti della DSGSD e lo stato della diga in termini di quadro fessurativo, e tenendo presente i risultati del modello numerico, in accordo con le Autorità italiane, sono stati decisi ed effettuati importanti lavori di riabilitazione per garantire la sicurezza a lungo termine della diga.

Sono state prese in considerazione diverse soluzioni di lungo termine. Tra quelle esaminate, la demolizione parziale della parte superiore della diga, dalla cresta a 1772m alla quota 1720m, è stata quella definitiva (Marcello 2013, Artaz 2015).

Il volume stimato di calcestruzzo da demolire è di circa 160.000m³. Il materiale è stato usato per riempire le due cavità presenti all'unghia di monte e al piede di valle della diga (Fig. 10). Questa soluzione presenta un effetto benefico sia per la stabilità della diga sia per quella del versante.

Nella fase di post demolizione la struttura assicurerà sostanzialmente la propria stabilità come diga a gravità.

Prima dell'inizio dell'intervento di demolizione, sono stati eseguiti alcuni lavori per ridurre l'entità dei movimenti della DSGSD e per meglio controllare l'esercizio del serbatoio. In particolare:

- realizzazione di un sistema di drenaggio e canalizzazione per limitare le acque meteoriche che fluiscono nella zona di distacco della DSGSD;
- aumento della capacità di deflusso in alveo immediatamente a valle della diga;
- costruzione di uno sfioratore a soglia variabile (tra 1702m e 1705m) che utilizza un by-pass già esistente come canale di scarico.

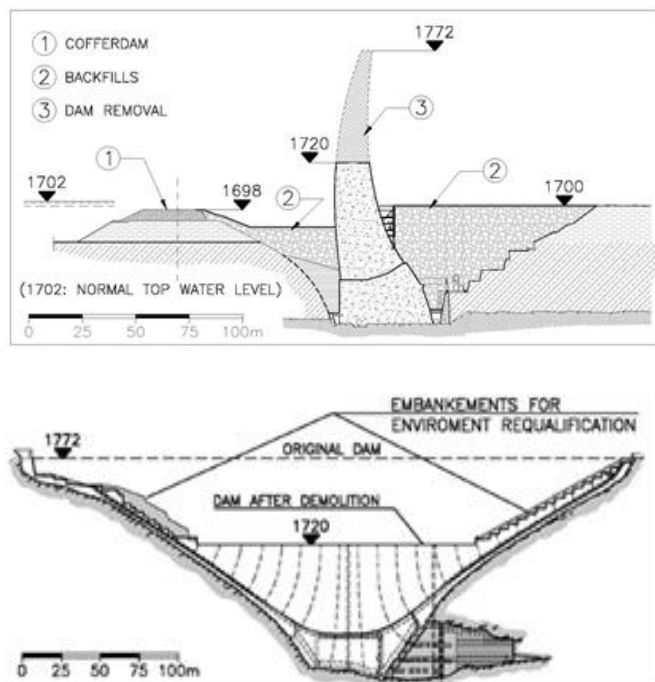


Figure 10. Cross section and downstream view of Beaugard dam after the partial demolition rehabilitation works / Sezione maestra e vista da valle della diga di Beaugard dopo la demolizione parziale.

Il progetto di riabilitazione ha riguardato la demolizione parziale della diga e la realizzazione di una serie di interventi complementari per una piena operatività dell'impianto e per la sistemazione finale dell'area.

In sintesi, i lavori eseguiti per le principali fasi del progetto sono riportati di seguito.

Anno 2011: avandiga temporanea

Il cantiere è stato avviato all'inizio di settembre. Per operare in sicurezza nella zona immediatamente a monte della diga, dove il materiale demolito avrebbe dovuto essere stoccato, è stato necessario costruire una protezione per contenere le acque del serbatoio.

A questo scopo è stata realizzata una avandiga, quota del coronamento a 1705m, per garantire la sicurezza del sito, come pure il funzionamento della centrale di Avise durante i lavori. Il nuovo canale di scarico e le opere realizzate in alveo a valle diga consentono un funzionamento sicuro del serbatoio durante i lavori con il livello d'acqua superiore a quota 1702m.

La Figura 11 mostra schematicamente la sezione trasversale dell'avandiga. Alla fine dei lavori la quota del coronamento sarà ridotta a 1692m nella parte centrale e 1698m nelle parti laterali.

Anno 2012: strutture al piede di valle della diga

Il materiale demolito posizionato a monte e a valle della diga in due depressioni realizzate all'epoca della costruzione della diga, non dovrà precludere gli accessi alle gallerie della diga.

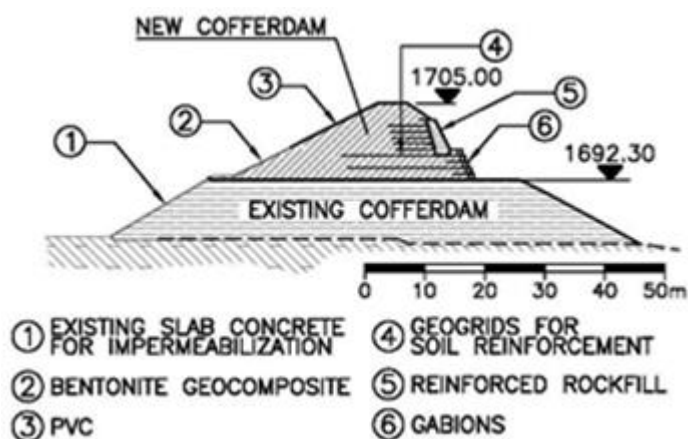


Figure 11. Cross section of the cofferdam (up) and aerial view (down) / Sezione trasversale dell'avandiga e vista aerea dell'opera.

Per consentire l'ispezione della parte inferiore della diga e la zona del paramento in cui sono presenti gli stati fessurativi, oltre che per consentire anche l'ispezione e la manutenzione delle valvole di scarico e della stazione di pompaggio delle filtrazioni situata al piede di valle della diga, sono stati realizzati tre pozzi di accesso.

Il pozzo principale è alto 40m e ha una sezione circolare, con un diametro interno di 7,4m. Lo scopo è quello di consentire il collegamento con il sistema di gallerie esistenti nella diga e con le camere dove sono alloggiati i componenti elettromeccanici.

Il secondo pozzo (di servizio), alto 20m con un diametro interno di 4m, permette la manutenzione della paratoia dell'opera di presa.

Il terzo pozzo permette l'accesso allo scarico di fondo.

Infine la parte inferiore del paramento di valle della diga è stato mantenuto accessibile per garantire il futuro controllo delle fessure sub-orizzontali (Fig. 12).

Nello stesso anno sono state eseguite le prime prove con esplosivo, soluzione scelta per la demolizione, per valutare gli aspetti legati al monitoraggio sismico-acustico del sito ed eventualmente definire o modificare il piano di esplosioni il cui inizio era previsto nella primavera del 2013.



Figure 12. New structures at the downstream toe of the dam and inspection shafts / Alcune delle nuove strutture poste a valle della diga e pozzi di ispezione.

Anni 2013-2014: demolizione della parte superiore della diga

La diga è stata demolita dalla cresta a quota 1772m fino a quota 1720m (52m); la quota del nuovo coronamento è stata verificata valutando l'altezza delle onde eventualmente causate da frane che potrebbero cadere nel bacino da entrambe le sponde della valle.

La metodologia scelta come la più adatta per demolire i 160.000m³ di calcestruzzo è quello della demolizione controllata con esplosivo che è stato installato in una fitta rete di fori posizionati secondo uno specifico studio che assicura il controllo di brillamento e l'orientamento della traiettoria del materiale prodotto dall'esplosione.

Si è ritenuto che la demolizione con esplosivo fosse preferibile a quella dei martelli demolitori a causa del ridotto rumore. La demolizione è stata eseguita per strati di circa 5-6m di spessore. Le perforazioni verticali per l'installazione dell'esplosivo avevano un diametro di 64 millimetri e spaziatura di circa 1,5m. Ogni operazione di brillamento ha richiesto circa 800kg di esplosivo per la distruzione di 2.500m³ di calcestruzzo. Ogni foro è stato innescato con detonatori "Nonel" e micro ritardi di 25 / 1.000sec per ridurre il numero di cariche contemporaneamente esplodenti e limitare di conseguenza le vibrazioni prodotte. La demolizione ha richiesto 14 mesi di lavoro, con una produzione media di 3.000m³ / settimana.

Le Figure 13 e 14 mostrano rispettivamente una fase di brillamento dell'esplosivo e la successiva fase di sistemazione del piano di coronamento.

Anno 2015: lavori conclusivi

La demolizione della parte più alta della diga ha reso necessaria la completa riqualificazione delle sponde. Per nascondere gli effetti delle demolizioni e rinaturalizzare i versanti, sono stati adottati gabbioni, terre rinforzate e tecniche di ingegneria ambientale (Fig. 15).



Figure 13. A sequence of the dam demolition: blasting phase / Sequenza della demolizione con esplosivo



Figure 14. A sequence of the dam demolition: cleaning and smoothing of the crest surface for further working phases / Sequenza dei lavori di demolizione: sistemazione della superficie del coronamento per le fasi successive.

Sono state messe a dimora diverse miscele di sementi sulle sponde a seconda della diversa esposizione solare, essendo la riva destra piuttosto umida, mentre il lato sinistro è più secco e soleggiato.

I detriti prodotti dalle esplosioni sono stati posizionati al piede della diga a valle con quota massima di 1700m lasciando scoperto l'accesso al pozzo principale (collegato ad un ascensore e scale) e l'accesso al pozzo di collegamento allo scarico di fondo.

A monte, l'avandiga è stata parzialmente demolita ed è stato realizzato un canale che permette il completo svuotamento del lago.

Alla fine della demolizione dell'avandiga, il serbatoio è stato completamente riempito fino a 1705 m s.m. (quota di massima regolazione).

4 CONCLUSIONI

La riabilitazione della diga di Beauregard è una *case-history* emblematica che ha posto ai tecnici incaricati dell'esercizio e della sicurezza scelte molto impegnative sia sotto il profilo tecnico sia economico.

Infatti, la costruzione di nuove strutture, e delle dighe in particolare, rappresenta la principale missione della professione ingegneristica e la demolizione, seppure parziale, di una grande opera come la diga di Beauregard ha posto delle domande complesse sul piano professionale. Nel caso specifico si è ritenuto necessario procedere, come a volte accade per la vita umana, con una sorta di un'amputazione al fine di salvare la vita della diga e di garantirne la sua estensione per un periodo di tempo significativo.



Figure 15. Works for naturalization of the right (up) and left (down) banks / Lavori di rinaturalizzazione della sponda destra (in alto) e sinistra (in basso).

Per raggiungere una decisione finale condivisa, chiara e convincente è stato necessario studiare molto approfonditamente e per lungo tempo tutti i possibili aspetti che potevano influire sulla soluzione finale.

La scelta è stata presa considerando i diversi aspetti del problema: la sicurezza, gli aspetti ambientali, la produzione di energia.

REFERENCES

- Barla, G., Ballatore, S., Chiappone, A., Frigerio, A., Mazzà, G. 2006. The Beauregard dam (Italy) and the deep-seated gravitational deformation on the left slope. *Hydropower 2006, Kunming, China*,
- Fenves, G., Lee, J. 1998. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*.

- Marcello, C., Meda, P. 2013. The rehabilitation design of the Beauregard Dam. *9th ICOLD European Club Symposium, Venice*.
- Artaz, L., Canella, G., Martinotti, G., Marcello, C., Meda, P., Frigerio, A., Mazzà, G. 2015. Partial demolition of Beauregard dam by blasting to guarantee its life extension. *25th ICOLD Congress, Stavanger (Norway)*.