

**Comitato Nazionale Italiano
delle Grandi Dighe ITCOLD**

**Il taglio con filo diamantato
negli interventi di ripristino delle dighe
in calcestruzzo soggette a rigonfiamento**



Membri del gruppo di lavoro

Ing Mario Berra *Coordinatore*

Ing. Baldovin Ezio

Ing. Brizzo Nicola

Ing. Canella Giovanni

Ing. De Donati Antonio

Prof. Maier Giulio

Dr. Mangialardi Teresa

Ing. Marcello Carlo

Ing. Mosconi Roberto

Ing. Natoli Virginia

Ing. Paolini Antonio Evangelista

Ing. Pistolesi Carlo

Ing. Sainati Francesco

Ing. Zaffaroni Pasquale

ITCOLD

GdL: Degrado dei materiali nelle dighe in calcestruzzo

II TAGLIO CON FILO DIAMANTATO NEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO DELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO SOGGETTE A RIGONFIAMENTO

INDICE

PRESENTAZIONE.....	4
1. PREMESSA.....	5
2. LA NASCITA E LO SVILUPPO DEL TAGLIO CON FILO.....	7
3. IL TAGLIO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO CON FILO DIAMANTATO.....	8
3.1. LA TECNICA ED I VANTAGGI.....	8
3.2. PRIMI IMPIEGHI NEL CAMPO DELLE OPERE CIVILI.....	11
4. IL TAGLIO CON FILO DIAMANTATO NELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO.....	12
4.1. INTERVENTI DI RIPRISTINO NELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO.....	12
4.2. LE DIGHE SOGGETTE A FENOMENI ESPANSIVI.....	19
4.2.1. CASISTICA INTERNAZIONALE.....	25
4.2.2. L'ESPERIENZA ITALIANA.....	43
4.3. DIFFICOLTÀ DI PREVISIONE CONNESSE CON IL TAGLIO.....	57
4.3.1. CHIUSURA DEL TAGLIO A BREVE TERMINE.....	59
4.3.2. CHIUSURA DEL TAGLIO A LUNGO TERMINE.....	60
5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	62
6. BIBLIOGRAFIA.....	64
ALLEGATO.....	66

PRESENTAZIONE

In relazione all'elevata età media delle dighe in calcestruzzo Italiane ed al recente riproporsi di fenomeni espansivi associati alla reazione alcali-aggregato nel calcestruzzo, si può ragionevolmente prevedere, per il prossimo futuro, un aumento dei casi di invecchiamento delle dighe per questi fenomeni. E ciò richiederà la realizzazione di sempre più numerosi interventi di ripristino, adeguati a prolungare nel tempo la vita in servizio di queste opere, in condizioni di sicurezza.

Per questo motivo, nell'ambito del Gruppo di Lavoro sul "Degradamento dei materiali nelle dighe in calcestruzzo" del Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe (ITCOLD), si è ritenuta necessaria una specifica riflessione sulla tecnica del taglio delle dighe con filo diamantato che, a tutt'oggi, rappresenta una delle più efficaci modalità di intervento per far fronte a fenomeni di rigonfiamento. Inoltre, la valorizzazione della prima esperienza di taglio, acquisita in Italia, per una diga in calcestruzzo soggetta alla reazione alcali-aggregato, accoppiata ad una analisi dell'esperienza sinora maturata a livello internazionale, può risultare di particolare interesse per tutti gli operatori del settore delle dighe in Italia.

Il presente rapporto, di cui è autore l'ing. Carlo Marcello, illustra la tecnica operativa del taglio con filo diamantato, con particolare riferimento agli interventi di ripristino delle dighe soggette a rigonfiamento, ne ricorda i vantaggi e documenta i positivi risultati sinora ottenuti. Affronta altresì le difficoltà di previsione del comportamento strutturale delle dighe dopo il taglio.

Naturalmente, con questo sintetico rapporto non si è inteso presentare una panoramica esaustiva dello stato dell'arte della tecnica del taglio con filo diamantato che, del resto, è ancora in fase di consolidamento. Più semplicemente, si è voluto offrire lo spunto e lo stimolo per gli ulteriori approfondimenti che ancora sono richiesti per una sua ottimale applicazione.

Il coordinatore del Gruppo di Lavoro
Mario Berra

II TAGLIO CON FILO DIAMANTATO NEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO DELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO SOGGETTE A RIGONFIAMENTO

1. PREMESSA

L'insorgere di fenomeni di rigonfiamento del calcestruzzo per effetto della reazione alcali-aggregato (AAR) è una circostanza oggi riscontrata in diverse dighe in calcestruzzo. Le principali conseguenze sono l'insorgere di elevati sforzi di compressione agenti (per le dighe ad asse rettilineo) lungo il loro asse longitudinale, che determinano deformazioni della struttura, disassamenti e fessurazioni, in qualche caso tali da ridurre le condizioni di sicurezza delle dighe stesse.

In alcune dighe, oltre ad anomale derive negli spostamenti della struttura o fessurazioni, il rigonfiamento del calcestruzzo si manifesta anche attraverso l'impossibilità di funzionamento degli organi di manovra delle luci di scarico, bloccati dall'aumento volumetrico del calcestruzzo circostante.

Una volta individuata nel rigonfiamento del calcestruzzo la causa delle anomalie riscontrate nella diga, occorre studiare quale possa essere l'intervento meno invasivo possibile per cercare di recuperare, almeno parzialmente, lo stato deformativo indotto, non essendo possibile arrestare il fenomeno espansivo ormai in atto nel calcestruzzo della diga.

L'intervento, che è stato adottato su molte dighe oggetto di interventi di ripristino, è quello di tagliare la struttura in più punti, per consentire il rilascio degli elevati sforzi di compressione ed il recupero, seppure parziale, delle deformazioni.

Il primo caso di cui si è a conoscenza è quello della diga di Santeetlah (Stati Uniti), per cui questo tipo di intervento è stato eseguito nel 1942. Le aperture sono state allora realizzate con perforazioni multiple ravvicinate (successive drillings). Successivamente, l'esperienza con l'uso del filo diamantato acquisita nelle cave, per estrarre o tagliare blocchi rocciosi, ha suggerito l'impiego di questo sistema anche per il calcestruzzo; antesignana in questo senso è stata la diga di Chickamauga (Stati Uniti), dove nel 1965 fu eseguito il primo taglio con questo sistema. In seguito questa tecnica venne perfezionata ed adottata per la diga di Fontana (Stati Uniti) nel 1976. Il primo caso al di fuori del territorio statunitense riguarda la diga di Mactaquac, in Canada, che rappresenta un passo importante nell'ambito dei tagli con filo diamantato, in quanto la virulenza del fenomeno espansivo (AAR) in atto, ha determinato la necessità di ripetere i tagli frequentemente.

Il presente rapporto si pone come obiettivo quello di esaminare la tecnica del taglio con filo diamantato nelle dighe in calcestruzzo, con particolare riferimento ai casi in cui tale intervento si è reso necessario a causa della presenza di fenomeni espansivi. Dopo aver fornito una panoramica in merito ai primi impieghi di questo sistema, viene mostrato come esso rappresenti, ormai, la soluzione "principe" nel campo degli interventi di ripristino su dighe affette da reazione alcali-aggregato. Si riportano, infine, alcuni casi internazionali ed italiani di dighe in cui è stato adottato questo sistema, analizzando le modalità operative, i parametri del macchinario, la produzione e soprattutto gli esiti dell'intervento.

2. LA NASCITA E LO SVILUPPO DEL TAGLIO CON FILO

Le prime tecniche di taglio con filo sono nate nelle cave, per cercare di ridurre al minimo l'impiego di esplosivo. Il filo elicoidale era un dispositivo per il taglio del marmo costituito da una funetta formata da tre fili di acciaio, avvolti ad elica e di lunghezza variabile, che poteva raggiungere i 1500 m, per i grandi tagli. In un'ora di marcia un filo poteva segare in media 60 m³ di materiale. Il filo veniva fatto scorrere ad una velocità di 5 ÷ 6 m/s ed il taglio del blocco era alimentato da una miscela abrasiva di acqua e sabbia silicea. I primi impieghi di questo tipo risalgono agli anni quaranta, appena prima del secondo conflitto mondiale.

Successivamente questa tecnica è stata implementata grazie a due fattori: lo svilupparsi di macchinari in grado di imprimere al filo velocità di oltre 20 m/s e soprattutto, negli anni cinquanta, la nascita dei diamanti sintetici, con la formazione, in laboratorio, di diamanti di innumerevoli dimensioni e forme, ottenuti portando ad alta pressione atomi di grafite. La sinterizzazione ad alte temperature (800 ÷ 1200 °C) di diamanti di questo tipo con leghe metalliche speciali, ha consentito di ottenere ottimi rendimenti in funzione dei materiali da tagliare.

3. IL TAGLIO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO CON FILO DIAMANTATO

3.1. LA TECNICA ED I VANTAGGI

L'iniziale impiego di cristalli di diamante nel campo dei tagli di materiali lapidei fece constatare come il potere tagliente fosse funzione non solo del tipo di diamante impiegato ma anche della concentrazione del diamante stesso sull'utensile; ci si rese conto di come i cristalli più grossi fossero idonei al taglio di materiali teneri mentre quelli più piccoli per i materiali duri.

Sulla base di questi accorgimenti, e ricollegandosi alla tecnica di taglio del filo elicoidale, si decise di realizzare cavi di acciaio con forti concentrazioni di piccoli cristalli di diamante su appositi anelli detti "perline" così da ottenere un filo diamantato [1].

Il filo diamantato da taglio è, infatti, costituito da una fune di acciaio chiusa ad anello sulla quale sono infilate, ad intervalli regolari, perline di acciaio impregnate di diamante. Il filo viene avvolto attorno alla struttura da tagliare ed azionato a grande velocità. L'azione combinata della rotazione del filo e della trazione esercitata, consente di tagliare materiali anche molto duri. L'efficacia di questa tecnica ha permesso di estenderne l'applicazione anche al settore della demolizione controllata di opere di ingegneria civile in calcestruzzo armato, con il taglio sia del conglomerato cementizio che dell'armatura.

In Figura 1 è riportato uno schema tipo di filo diamantato ed in Figura 2 una immagine fotografica.

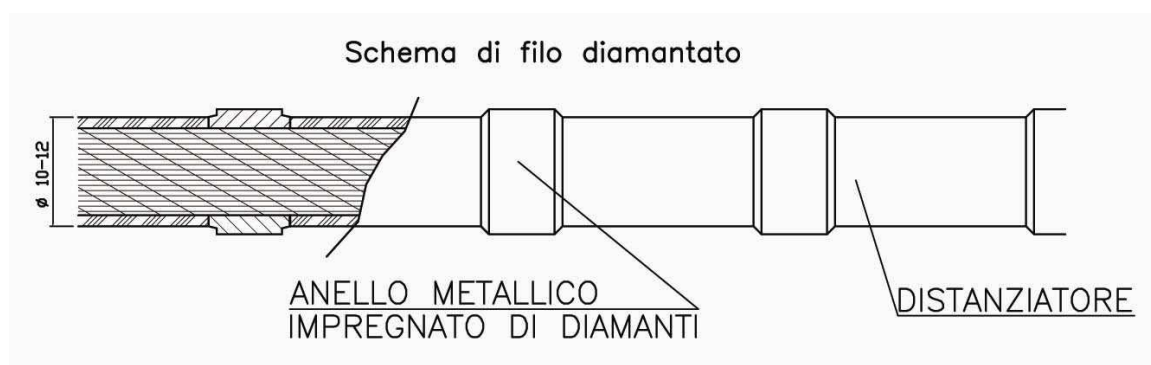


Figura 1. Schema di filo diamantato [2]



Figura 2. Fotografia di filo diamantato [3]

Prima dell'introduzione di questa tecnica, la metodologia più comune per la rimozione di pesanti strutture comportava l'impiego di demolitori a sfera montati su gru, martinetti idraulici, martelli pneumatici, oppure l'esecuzione di una serie di fori accostati per ottenere un'apertura. Questi metodi tradizionali sono in grado di sviluppare una grande potenza, ma il loro impiego spesso può comportare degli svantaggi, tra i quali:

- per ottenere un'apertura è inevitabile doverne praticare una più larga, per poi procedere al successivo ripristino del calcestruzzo, con la costruzione di contorni regolari;
- la percussione contro il ferro di armatura trasmette vibrazioni all'intera struttura determinando microlesioni che la danneggiano (il problema delle vibrazioni riguarda comunque anche strutture prive di armatura);

- l'intervento è estremamente invasivo, polveroso e rumoroso;
- nella esecuzione manuale le condizioni di lavoro sono svantaggiose e fortemente penalizzanti per l'operatore.

L'impiego del filo diamantato consente di ovviare a questi inconvenienti. Esso presenta, infatti, notevoli vantaggi, tra i quali:

- limitata produzione di detriti e polveri;
- ridotta rumorosità;
- limitato affaticamento dell'operatore;
- alta precisione, tale da non richiedere rifiniture successive delle superfici;
- maggiore velocità di taglio e di rimozione rispetto ai metodi convenzionali;
- il livello di vibrazioni prodotte è molto basso, e quindi salvaguarda l'integrità delle strutture circostanti;
- i tagli possono essere eseguiti in aree di difficile accesso (tagli a distanza) o su strutture con particolare configurazione, rispettando la sicurezza e senza la necessità di dover rimuovere impianti o apparecchiature che ostacolano il lavoro;
- possono essere praticati anche tagli subacquei.

In Figura 3 si riporta uno schema di taglio di un blocco

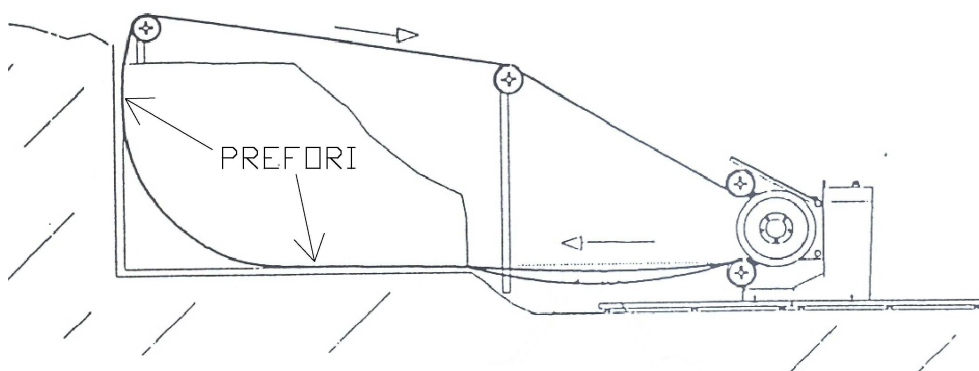


Figura 3. Schema di taglio di blocchi lapidei

3.2. PRIMI IMPIEGHI NEL CAMPO DELLE OPERE CIVILI

I primi impieghi di questa tecnica nel campo delle opere civili si sono avuti soprattutto in Giappone (primi anni ottanta), dove questa tecnica è frequentemente utilizzata grazie alla notevole quantità di interventi di ampliamento e ristrutturazione eseguiti ed alle severe restrizioni riguardanti le fonti di inquinamento acustico, polvere e vibrazioni.

Si riportano i principali parametri di alcuni interventi eseguiti:

- Rimozione del ponte autostradale tra Ohi-Matdsuda e Gotenba (Giappone):
 - superficie totale del taglio: 8,5 m²
 - velocità del taglio: 1 m²/h
 - velocità del filo: 25 m/s
- Nuova banchina della metropolitana di Osaka (Giappone):
 - superficie totale del taglio: 500 m²
 - velocità del taglio: 1,5 m²/h
 - velocità del filo: 20 m/s
- Ristrutturazione dell'ospedale di Nagoya (Giappone):
 - superficie totale del taglio: 48 m²
 - velocità del taglio: 2 m²/h
 - velocità del filo: 25 m/s

Per tutti questi interventi è stata adottata la tecnica di taglio con filo diamantato soprattutto per consentire, nel caso della metropolitana e dell'ospedale, il continuo esercizio delle strutture durante i lavori, grazie alla scarsa produzione di rumore e detriti. Per quanto riguarda il ponte autostradale la scelta è stata dettata dalla rapidità di esecuzione. Infatti è stato necessario chiudere il transito agli autoveicoli per una sola notte.

E' inoltre interessante notare come questa tecnica sia stata oggetto di notevole perfezionamento in funzione della tipologia di calcestruzzo da tagliare. Infatti gli

interventi riportati, che sono successivi cronologicamente, mostrano un continuo incremento di produzione (velocità di taglio).

4. IL TAGLIO CON FILO DIAMANTATO NELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO

4.1. INTERVENTI DI RIPRISTINO NELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO

Per le motivazioni elencate in precedenza, il taglio con filo diamantato è stato adottato anche negli interventi di demolizione controllata nel campo delle dighe. Infatti, le ridotte vibrazioni consentono di non danneggiare il corpo diga, il taglio può essere eseguito sott'acqua e, qualora anche il serbatoio dovesse essere svasato, la velocità del taglio e la sua precisione (tale da non dovere rifinire le superfici) fa sì che il fuori esercizio dell'impianto sia ridotto al minimo.

Tutti questi aspetti, oltre al fatto di consentire l'esecuzione di interventi anche in zone di difficile accesso, hanno favorito lo sviluppo della tecnica di taglio con filo nelle dighe.

In Italia si possono citare i seguenti esempi:

- o Diga di Corongiu (Sardegna)

Nell'ambito dei lavori di adeguamento alle norme di sicurezza (2005), era stato previsto il taglio di una porzione del corpo diga, senza che in alcun modo potessero essere trasmesse sollecitazioni alla struttura. In Figura 4 si riporta una fotografia della superficie tagliata.

La produzione di questo intervento è stata di 1 m²/h.



Figura 4. Diga di Corongiu - superficie tagliata con filo diamantato [4]

o Diga di Combamala (Piemonte)

Nell'ambito delle opere civili per la dismissione della diga (1996-1997), per effettuare tre aperture nel corpo diga di 12 x 2,8 x 1,6 m è stato deciso di intervenire con la tecnica del filo diamantato. Ciò ha permesso di soddisfare alle prescrizioni imposte che esigevano che la struttura non fosse sottoposta a vibrazioni né che si arrecassero danni all'integrità strutturale. Le tre aperture sono state ottenute sezionando la struttura in cinque blocchi, ognuno del peso di oltre 200 quintali, che poi, ancorati con l'autogru, sono stati asportati. Il taglio con filo diamantato ha consentito, inoltre, di superare le difficoltà create dall'armatura in ferro esistente. In Figura 5 si può vedere la macchina in fase di taglio.



Figura 5. Diga di Combamala - macchina per taglio con filo diamantato [5]

o Diga di S. Chiara (Sardegna)

A seguito della realizzazione del nuovo sbarramento a valle della Diga di S. Chiara, è stato necessario praticare delle aperture nella struttura esistente per consentire il passaggio delle acque e quindi la creazione del nuovo invaso. Queste aperture sono state eseguite con la tecnica del taglio con filo diamantato (2000). La scelta di impiego di questa tecnica ha avuto come vantaggi la precisione e rapidità dell'intervento e soprattutto l'assenza di elevate sollecitazioni sulle porzioni contigue della struttura. Per la realizzazione delle due aperture al paramento di monte dello sbarramento è stato necessario tagliare oltre 600 m² di calcestruzzo. In Figura 6 si possono vedere le porzioni di calcestruzzo tagliate in prossimità di una apertura, mentre in Figura 7 la precisione del taglio.



Figura 6. Diga di S. Chiara - tagli eseguiti con filo diamantato [3]



Figura 7. Diga di S. Chiara - superficie tagliata con filo diamantato [3]

o Diga dell'Eugio (Piemonte)

Tra gli interventi di ripristino dell'integrità della Diga dell'Eugio (a speroni), nel 2003 è stato eseguito il taglio della parte alta di tre giunti di costruzione, dal momento che gli estensimetri posti a cavallo degli stessi segnalavano, negli ultimi anni, un anomalo impuntamento di alcuni speroni, verosimilmente prodotto da una serie di concause.

Si è deciso di eseguire questo intervento con la tecnica del filo diamantato per i vantaggi di tipo tecnico-strutturale sopra esposti ed anche in quanto ha consentito di non svasare completamente il serbatoio [6][7]. Il taglio è stato realizzato con il macchinario posto sul coronamento (schema di Figura 8). Esso imprimeva al filo una velocità di circa 25 m/s ed allo stesso tempo lo trainava dal basso verso l'alto, muovendosi su un binario. Il filo è stato fatto passare attraverso un preforo alla base del taglio. Lo schema di funzionamento del macchinario è stato quello riportato in Figura 8.

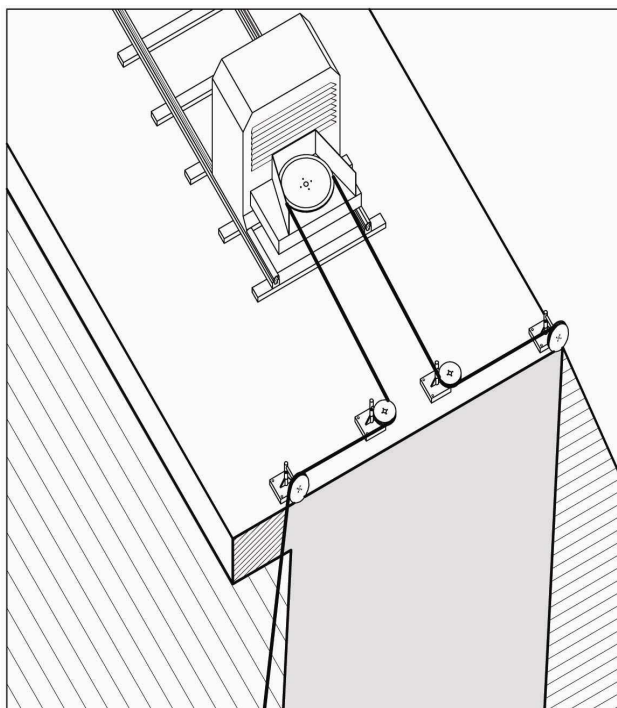


Figura 8. Schema della macchina per taglio con filo diamantato

In Figura 9 si può vedere la suggestiva immagine di un giunto tagliato attraverso il quale passa la luce.



Figura 9. Diga dell'Eugio - giunto tagliato

Gli interventi in questione sono stati istruttivi soprattutto per un aspetto del taglio dei giunti di costruzione che non era mai stato riscontrato in letteratura e di cui la diga dell'Eugio è stata antesignana e cioè che i giunti non sono "piani". Questo aspetto per certi versi ovvio, se si pensa alle cassature in legno di un tempo, è stato causa, alla diga dell'Eugio, della formazione di scaglie di calcestruzzo tra il giunto preesistente (storto) ed il nuovo taglio (diritto), come è indicativamente spiegato nello schema di Figura 10.

VISTA SCHEMATICA IN PIANTA DELLA SCAGLIA

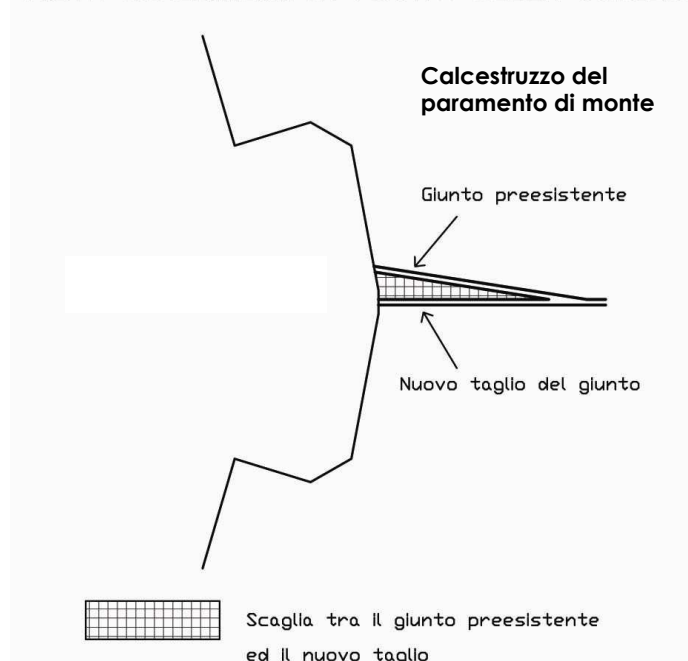


Figura 10. Schema di "scaglia" rimasta tra le superfici del giunto e del taglio

Le scaglie in questione si sono rivelate ridotte, come estensione, e di spessore tale da non impedire il serraggio, al respiro del giunto. Ciò nonostante, a titolo precauzionale, la Commissione di Collaudo ha ritenuto opportuno farle asportare.

L'asportazione delle scaglie è stata effettuata essenzialmente in forma manuale dal paramento di monte attrezzato con ponteggio mobile motorizzato, con l'impiego di una piattina metallica di 5 mm di spessore.

A verifica dell'effetto conseguito, una definitiva passata del filo diamantato nel piano di taglio ha assicurato la miglior pulizia del piano di giunto con l'asportazione di tutti i residui delle "scaglie".

In Figura 11 si può notare una delle scaglie in questione, prima dell'asportazione.



Figura 11. Diga dell'Eugio - vista della "scaglia" nel giunto

Questo particolare aspetto è stato istruttivo per i successivi interventi alla Diga del Poggia (si veda il paragrafo relativo all'esperienza Italiana sui tagli di dighe soggette a fenomeni espansivi).

4.2. LE DIGHE SOGGETTE A FENOMENI ESPANSIVI

Si sono descritti in precedenza alcuni interventi di taglio eseguiti su dighe per le più svariate ragioni. Si analizza ora nel dettaglio questo tipo di intervento per dighe affette da fenomeni espansivi del calcestruzzo dovuti alla reazione alcali-aggregato (AAR).

La reazione alcali-aggregato, o meglio la più nota e frequente tra le reazioni che vanno sotto questo nome, la reazione alcali-silice (ASR), è una reazione che avviene tra alcuni minerali silicei presenti negli "aggregati reattivi" e gli ioni ossidrili

OH⁻ associati agli alcali presenti nella soluzione dei pori del calcestruzzo. Il risultato di questa reazione è la formazione di un gel silicatico alcalino che, in presenza di acqua, assume caratteristiche espansive. Il fenomeno è illustrato in letteratura tecnica e l'intera problematica connessa alle dighe in calcestruzzo è esaminata in Bollettino del Comitato Internazionale delle Grandi Dighe (ICOLD) del 1991 [8]. Essa è oggetto anche di rapporto aggiornato da parte del Gruppo di Lavoro ITCOLD "Degrado dei materiali per dighe in calcestruzzo", attualmente ancora in fase di preparazione.

Questo fenomeno, determinando l'espansione del calcestruzzo, può portare ad elevati sforzi nella struttura: il taglio con filo diamantato (Figura 12) si è rivelato il migliore tipo di intervento correttivo, soprattutto per le seguenti ragioni:

- Rilascio degli sforzi
- Apertura dei giunti e chiusura delle fessure
- Riduzione dello stato di fessurazione
- Correzione di deformazioni dannose per gli organi elettromeccanici
- Recupero parziale delle deformazioni cumulate

Inoltre, l'esecuzione di tagli nella struttura consente anche di assorbire eventuali ulteriori espansioni. In molti casi, però, è risultato difficile predire la richiusura a breve e a lungo termine dei tagli eseguiti; questo è dovuto a vari aspetti quali la difficoltà di valutare lo stato iniziale di sforzo nella struttura e le leggi reologiche di decompressione del materiale dove il fenomeno di AAR si sovrappone a fenomeni viscoelastici del calcestruzzo (creep), in presenza di effetti termici. Alcuni di questi aspetti verranno esaminati nel paragrafo dedicato alle difficoltà di previsione connesse con il taglio delle dighe.

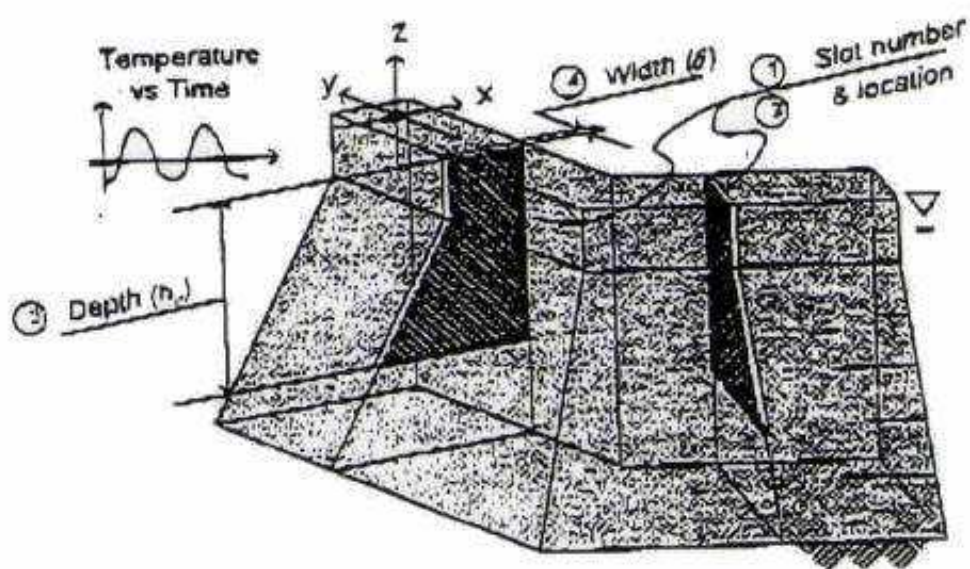


Figura 12. Schema di tagli in una diga di calcestruzzo affetta da AAR [9]

La letteratura testimonia il progressivo impiego di questa tecnica per dighe soggette all'espansione del calcestruzzo. In Tabella 1 si riporta un elenco di tutte le dighe di cui si è a conoscenza, a livello mondiale, su cui sono stati eseguiti interventi di taglio con filo diamantato per limitare l'effetto dell'espansione da reazione alcali-aggregato (AAR).

Tabella 1 – Dighe affette da AAR su cui sono stati eseguiti tagli [10]

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Data costruzione	Sintomo	Rimedio	Data interventi
1	Chickamauga	USA		1940		Esecuzione di tagli nella struttura con filo diamantato	1965, 1970
2	Fontana	USA	Gravità	1946	Fessurazione diffusa	Iniezione delle fessure ed esecuzione del taglio di un giunto di costruzione tramite una serie di carotaggi e filo diamantato	1976, 1983
3	Mactaquac	Canada	Rockfill	1964-1980	Deformazioni anomale di una pila dello scarico di superficie con conseguente inamovibilità di una paratoia, fessurazione delle pile	Taglio con filo diamantato del calcestruzzo dell'opera di presa e delle pile dello scarico di superficie	1988-1995
4	Chambon	Francia	Gravità	1934	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Iniziale iniezione delle fessure ed impermeabilizzazione del paramento, successivi tagli nella diga con filo diamantato e ripristino dell'impermeabilizzazione del paramento.	1995-1997
5	Dale	Norvegia	Gravità	1952	Fessurazione diffusa, blocco paratoia	Iniezione delle fessure, taglio dei giunti di costruzione ed impermeabilizzazione del paramento	
6	Paugan	Canada	Gravità	1928	Fessurazione diffusa	Esecuzione di due tagli con filo diamantato	1991
7	La Tuque	USA	Gravità	1940		Esecuzione di un taglio nella struttura con filo diamantato	1993
8	Hiwassee	USA		1940		Esecuzione di quattro tagli nella struttura con filo diamantato	1993-1994
9	RH Saunders	Canada	Gravità	1947	Deformazioni anomale della struttura	Esecuzione di tagli con filo diamantato nella struttura	1993-1995
10	Rapides Farmers	Canada		1927		Esecuzione di due tagli nella struttura con filo diamantato	1993-1995
11	Tislei	Norvegia		1952	Fessurazione diffusa	Impermeabilizzazione, iniezione delle fessure e taglio dei giunti di espansione	
12	Chute-à-Caron	Canada	Gravità	1930		Esecuzione di un taglio nella struttura con filo diamantato	1997
13	Poglia	Italia	Gravità alleggerita	1950	Anomale deformazioni e fessurazione diffusa	Taglio dei giunti di costruzione con filo diamantato	2005

Dall'esame della letteratura tecnica è, inoltre, emerso come, prima dell'affermarsi della tecnica del filo diamantato, venissero impiegati per dighe affette da fenomeni espansivi, interventi molto complessi, soprattutto a base di iniezione delle fessure e di rinforzo della struttura, entrambi contrari al principio dei tagli che, invece, servono a consentire il rilascio degli sforzi ed a recuperare le deformazioni accumulate.

Nell'ambito delle attività del Gruppo di Lavoro ITCOLD "Degradamento dei materiali per dighe in calcestruzzo", è stata condotta una apposita indagine, in campo internazionale, in merito alle tipologie di intervento sinora eseguite su dighe affette da fenomeni espansivi del calcestruzzo (Tabella in Allegato al presente rapporto). Si è potuto così constatare come, complessivamente, i tagli nella struttura siano stati adottati in circa il 31% dei casi esaminati, ottenuti sommando il 21% di semplici tagli con il 10% di tagli associati ad altri interventi (impermeabilizzazioni, drenaggi, iniezioni).

In Figura 13 si riporta un grafico ad istogramma che mostra le tipologie degli interventi di riabilitazione eseguiti e la corrispondente percentuale.

Va però sottolineato come ogni intervento sia legato ai criteri progettuali adottati che, a loro volta, dipendono anche dall'entità di espansione sviluppata (tempo di espansione e grado di virulenza del fenomeno) e dal livello di danneggiamento subito dalla diga.

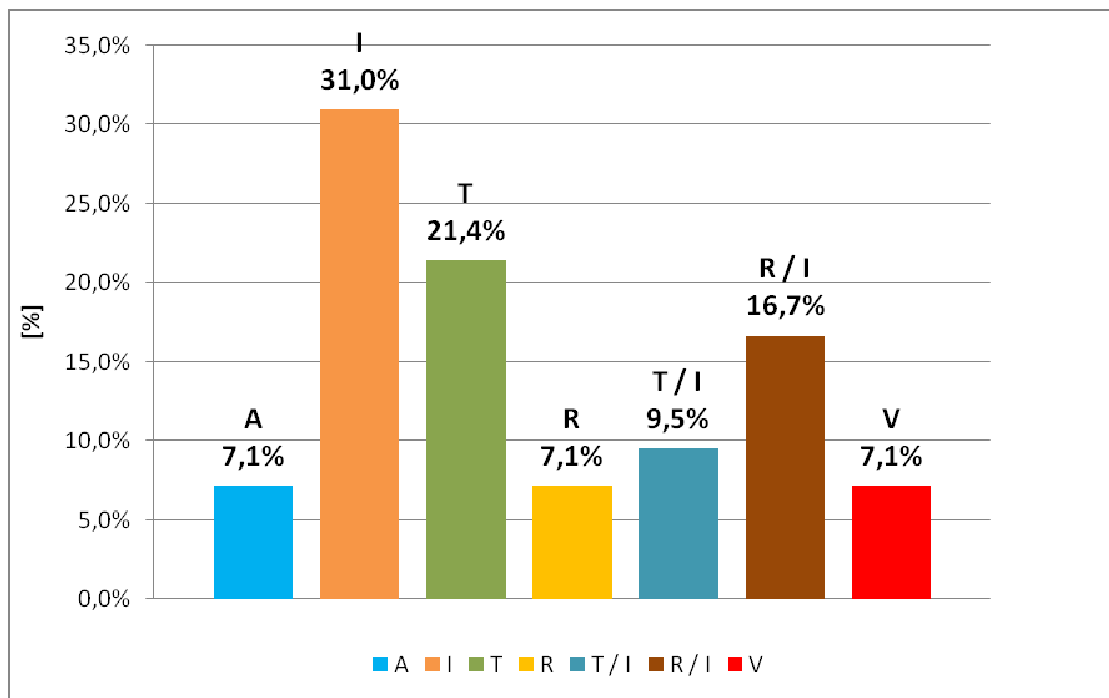


Figura 13. Interventi eseguiti su dighe affette da AAR [10]

Legenda:

- A** Abbandono
- I** Impermeabilizzazioni – Drenaggi – Iniezioni
- T** Tagli
- R** Rinforzi strutturali
- T / I** Tagli + Impermeabilizzazioni – Drenaggi – Iniezioni
- R / I** Rinforzi strutturali + Impermeabilizzazioni – Drenaggi – Iniezioni
- V** Interventi Vari

4.2.1. CASISTICA INTERNAZIONALE

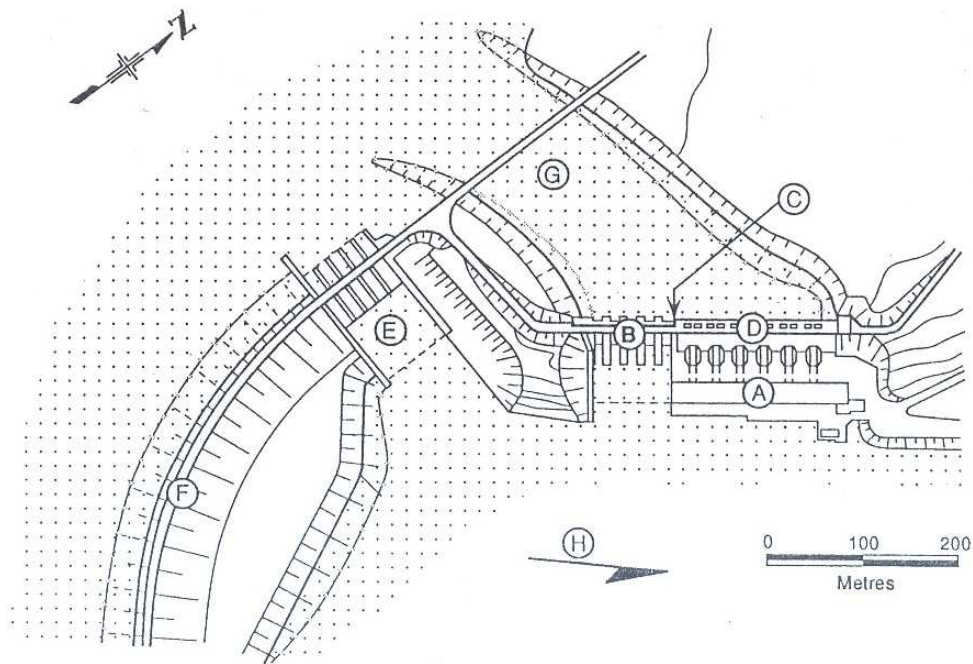
I casi internazionali di maggiore rilievo e di cui si dispone di più materiale di letteratura sono sicuramente le Dighe di Mactaquac in Canada, Chambon in Francia e Fontana negli Stati Uniti.

➤ Mactaquac (Canada)

La Diga di Mactaquac [11][12][13] rappresenta una tappa fondamentale nell'impiego della tecnica del filo diamantato per dighe affette da AAR, sia per i modelli di calcolo previsionali adottati che per gli accorgimenti tecnici impiegati nell'esecuzione dei tagli. Come si può notare dalla Tabella 1, infatti, fatta eccezione per le prime due dighe statunitensi (Chickamauga e Fontana) in cui è stato realizzato un solo taglio, insieme ad altri interventi, Mactaquac rappresenta il primo e vero campo prova per dighe soggette a fenomeni espansivi, campo prova preso a riferimento per tutti i successivi interventi eseguiti in altri sbarramenti.

Mactaquac è una diga in rockfill, in Canada, ultimata nel 1968, dotata di uno scarico di superficie in calcestruzzo, con luci regolate da paratoie, confinante con le sei opere di presa che alimentano i gruppi della centrale sottostante. Già nei primi anni ottanta si erano riscontrate alcune fessure nel calcestruzzo dell'opera di presa, ma la certezza dei fenomeni espansivi del calcestruzzo la si è avuta nel 1985 quando non è stato più possibile movimentare la paratoia di sinistra dello scarico di superficie, a causa dell'elevata deformazione della pila sinistra su cui è montata la guida della paratoia stessa.

Per una migliore comprensione del problema, in Figura 14 si riporta la planimetria dell'impianto ed in Figura 15 la vista da valle dello scarico di superficie e dell'opera di presa con le sue sei unità.

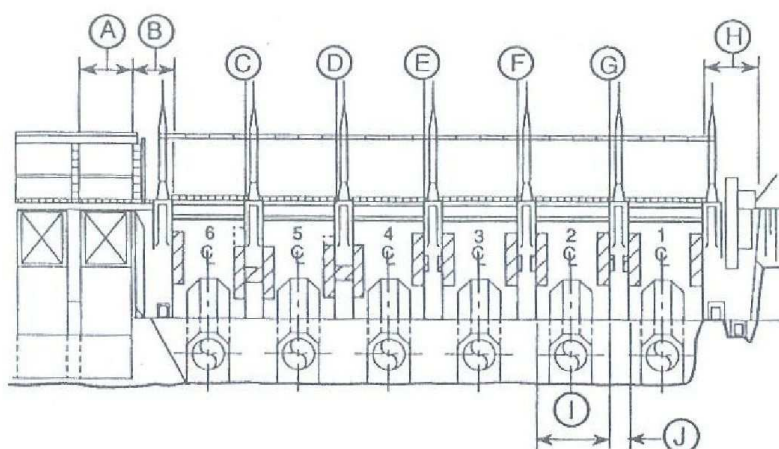


Project Plan

Vue en plan de l'aménagement

- | | |
|----------------------------|--|
| (A) Powerhouse | (A) Centrale |
| (B) Main Spillway | (B) Évacuateur de crue principal |
| (C) Spillway East End Pier | (C) Pile d'extrémité est de l'évacuateur de crue |
| (D) Intake Structure | (D) Prise d'eau |
| (E) Diversion Sluiceway | (E) Pertuis de dérivation |
| (F) Main Dam | (F) Barrage principal |
| (G) Intake Channel | (G) Canal de prise |
| (H) Saint John River | (H) Fleuve Saint-Jean |

Figura 14. Diga di Mactaquac – planimetria [11]



Intake Structure - Slot Cutting
Microsaignées dans la prise d'eau

- | | |
|-------------------------------------|---|
| (A) Spillway Bay 10 | (A) <i>Pertuis 10 de l'évacuateur de crue</i> |
| (B) Spillway East End Pier | (B) <i>Pile d'extrémité est de l'évacuateur de crue</i> |
| (C) Slot cut 5/6 (1988, 1989, 1992) | (C) <i>Microsaignée 5/6 (1988, 1989, 1992)</i> |
| (D) Slot Cut 4/5 (1989, 1992) | (D) <i>Microsaignée 4/5 (1989, 1992)</i> |
| (E) Slot Cut 3/4 (1992) | (E) <i>Microsaignée 3/4 (1992)</i> |
| (F) Slot Cut 2/3 (1989, 1992) | (F) <i>Microsaignée 2/3 (1989, 1992)</i> |
| (G) Slot Cut 1/2 (1992) | (G) <i>Microsaignée 1/2 (1992)</i> |
| (H) Elevator Block | (H) <i>Plot de l'ancien ascenseur</i> |
| (I) Intake Block (Typical) | (I) <i>Plot de prise (type)</i> |
| (J) Monolith Block (Typical) | (J) <i>Plot monolithé (type)</i> |

Figura 15. Diga di Mactaquac – opera di presa [11]

Si è riscontrata una capacità espansiva del calcestruzzo di $50\div 150 \mu\text{m}/\text{anno}$ (0.005 – 0.015 %/anno).

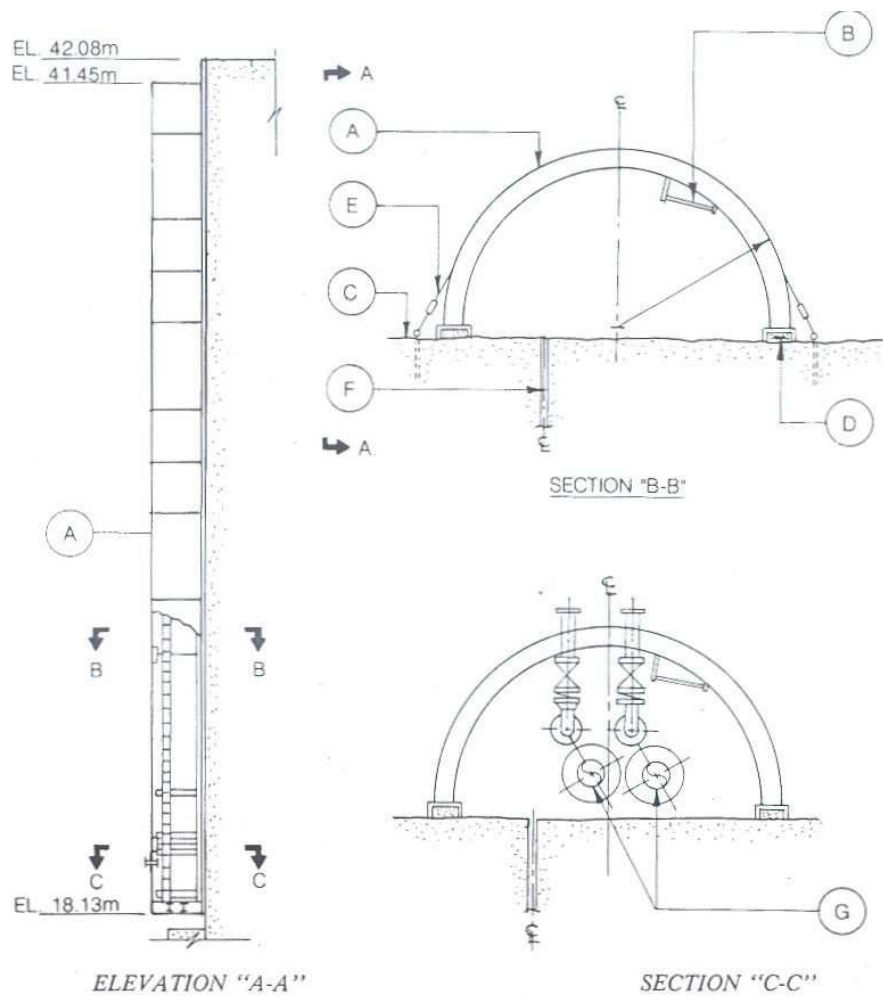
Per queste ragioni venne organizzato un programma di tagli negli anni, tale da recuperare le deformazioni accumulate nella struttura e rilasciare gli elevati sforzi di compressione. Si scelse, infatti, il filo diamantato sia per non danneggiare lo scarico e l'opera di presa ma anche per controllare progressivamente il comportamento della struttura e consentire una più agevole programmazione degli interventi.

Nel 1988 si iniziò con il taglio del calcestruzzo tra le unità 5-6 con un filo diamantato di 10 mm di diametro. Il taglio si richiuse subito di 8 mm; venne eseguito per una parte dal basso e per la restante dall'alto. Grazie a questo intervento furono recuperati 4,7 mm (dei 25 di deformazione misurata) e 1,5 MPa (dei 3,0 di compressione misurati). Questo primo ed unico taglio, per l'anno 1988, richiese l'esecuzione di un "cofferdam" sul paramento di monte, per evitare la penetrazione dell'acqua. Esso fu costituito da una struttura ad arco con all'interno pompe per l'aggottamento dell'acqua, come si può vedere in Figura 16. Tale intervento fu eseguito per evitare di svasare il serbatoio. Il taglio venne poi iniettato con boiaccia di cemento.

Nel 1989 venne eseguita una seconda campagna di tagli tra le unità: 2-3, 4-5 e 5-6 (riapertura del taglio del 1988). Venne impiegato un filo da 13 mm di diametro. Questa volta tutti i tagli rimasero aperti, senza necessità di un secondo passaggio del filo; dopo questi interventi le deformazioni della pila sinistra dello scarico di superficie sembrarono stabilizzarsi, così come l'evoluzione del suo stato fessurativo. Nonostante ciò, nel 1992, l'evolversi dell'espansione del calcestruzzo aveva portato alla chiusura della parte alta dei tagli eseguiti nel 1989. Vennero pertanto eseguiti nuovi tagli alle unità: 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6. Anche questa volta venne adottato un filo da 13 mm di diametro e, data l'esperienza maturata negli anni precedenti e cercando di evitare la complicazione di un sistema di impermeabilizzazione, quale quello adottato nel 1988 (cofferdam), venne realizzato un interessante sistema di impermeabilizzazione del taglio in grado di assorbire la sua chiusura e da non essere intaccato dal filo. Il sistema water stop in questione è riportato in Figura 17.

Questo sistema realizzato al centro dell'ammasso di calcestruzzo da tagliare rappresentava inoltre il confine tra le due fasi di taglio di ciascun ammasso, come si può vedere in Figura 18.

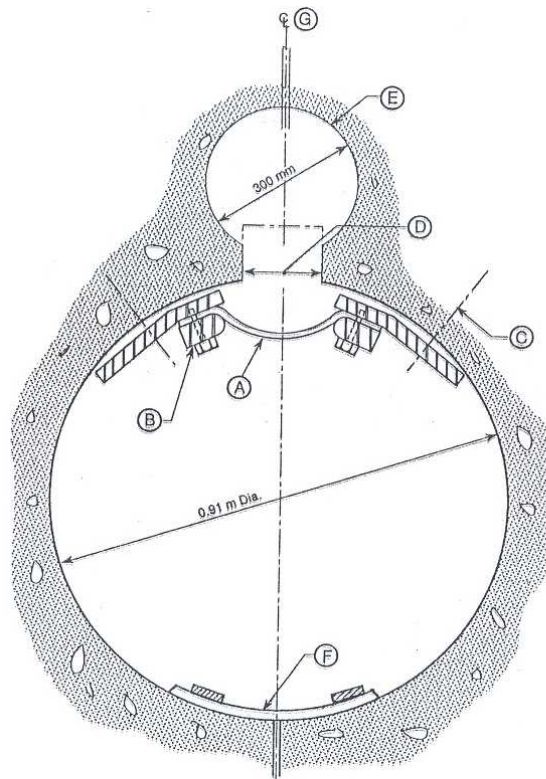
I tagli sono stati eseguiti dall'alto verso il basso.



Elevation & sections of blister cofferdam
Élévation et coupes du batardeau semi-circulaire

- | | |
|------------------------------------|---|
| (A) Blister cofferdam | (A) <i>Batardeau semi-circulaire</i> |
| (B) Continuous steel ladder | (B) <i>Échelle continue en acier</i> |
| (C) Face of intake | (C) <i>Parement de l'ouvrage de prise</i> |
| (D) Fabric bag filled with grout | (D) <i>Sac en toile rempli de coulis</i> |
| (E) Galvanized installation cables | (E) <i>Câbles d'installation galvanisés</i> |
| (F) Saw cut and contraction joint | (F) <i>Microsaignée et joint de contraction</i> |
| (G) Sump pumps | (G) <i>Pompes de puisard</i> |

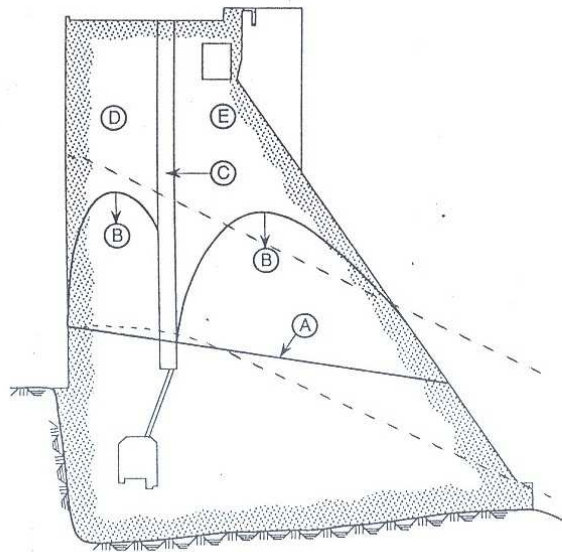
Figura 16. Diga di Mactaquac - sistema di cofferdam adottato durante i tagli [12]



Intake Mechanical Waterstop
Waterstop mécanique à la prise d'eau

- | | |
|--|---|
| (A) Flexible Mechanical Waterstop Seal | (A) <i>Waterstop mécanique flexible</i> |
| (B) Batten Bars and Steel Frame | (B) <i>Tringles et charpente en acier</i> |
| (C) Expansion Anchors (Type) | (C) <i>Coquilles à expansion (type)</i> |
| (D) Starter Void | (D) <i>Trou d'accès</i> |
| (E) Sheave Hole | (E) <i>Trou de poulie</i> |
| (F) Secondary Seal | (F) <i>Étanchéité secondaire</i> |
| (G) Slot Cut | (G) <i>Microsaignée</i> |

Figura 17. Diga di Mactaquac - sistema di waterstop adottato durante tagli [11]



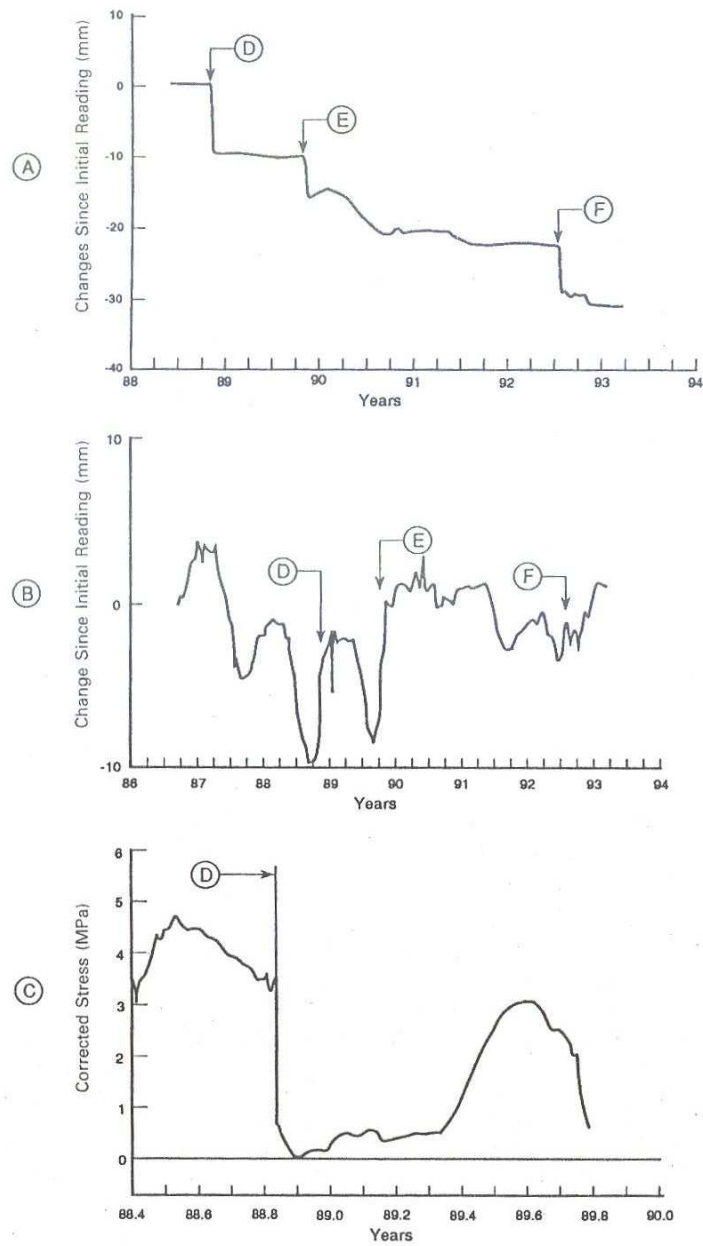
Section through Intake Showing
1992 Cutting Arrangement

*Coupe transversale de la prise d'eau montrant
la disposition de la coupe en 1992*

- | | |
|----------------------------|--|
| (A) Existing Slot Bottom | (A) <i>Fond de la microsaignée existante</i> |
| (B) Cut Direction - varies | (B) <i>Direction de la coupe - varie</i> |
| (C) Mechanical Waterstop | (C) <i>Waterstop mécanique</i> |
| (D) Stage 1 Cut | (D) <i>Étape 1 de la coupe</i> |
| (E) Stage 2 Cut | (E) <i>Étape 2 de la coupe</i> |

Figura 18. Diga di Mactaquac - posizione del waterstop [11]

Infine si può notare l'efficacia degli interventi di taglio eseguiti a Mactaquac dai grafici di Figura 19, che si riferiscono ad un estensimetro tra le unità 5-6 (A), un pendolo nella pila sinistra dello scarico di superficie (B) ed un misuratore di sforzo all'interno dell'unità 6 (C). I salti dei grafici sono proprio in corrispondenza degli interventi di taglio.



- | | |
|--|---|
| (A) Invar Extensometer BZ 12.1 between Unit 6 and Monolith 5 | (A) Extensomètre en invar BZ 12.1 entre la tranche 6 et le plot monolithe 5 |
| (B) Plumbline East End Pier | (B) Pendule direct de la pile d'extrémité est |
| (C) Intake Unit 6 - Stress Cell | (C) Prise d'eau de la tranche 6 - Cellule de contrainte |
| (D) 1988 Slot Cut | (D) Microsaignée de 1988 |
| (E) 1989 Slot Cut | (E) Microsaignée de 1989 |
| (F) 1992 Slot Cut | (F) Microsaignée de 1992 |

Figura 19. Diga di Mactaquac - estensimetro, pendolo e misuratore di sforzi [11]

➤ Chambon (Francia)

La Diga di Chambon, in Francia, è del tipo a gravità massiccia, ultimata nel 1935. 25 anni dopo la costruzione sono stati riscontrati una fessurazione diffusa in evoluzione ed una deriva irreversibile negli spostamenti, misurati dal sistema di monitoraggio installato [14] [15] [16].

Da allora la diga si è alzata di oltre 3 mm/anno, con spostamenti verso monte fino a circa 5 mm/anno (Figura 20) e la zona verso la spalla sinistra, dove è ubicato lo scarico di superficie, si è rivelata la più compressa (5 MPa) e con le maggiori deformazioni.

Si è riscontrata una capacità espansiva del calcestruzzo di $10\div 80 \mu\text{m}/\text{anno}$ (0.0010 – 0.0080 %/anno).

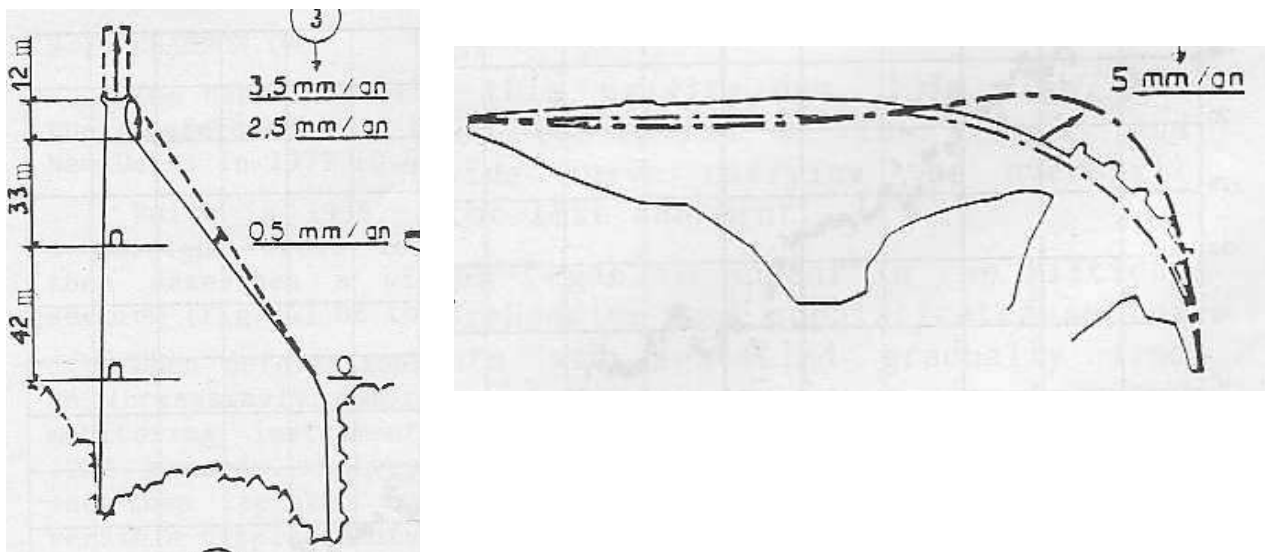


Figura 20. Diga di Chambon – Spostamenti della diga [16]

Inizialmente si è pensato alla realizzazione di una nuova struttura; poi, per ragioni economiche, sono stati studiati degli interventi atti a garantire l'esercizio dello sbarramento per altri 20 anni; gli interventi sono consistiti in:

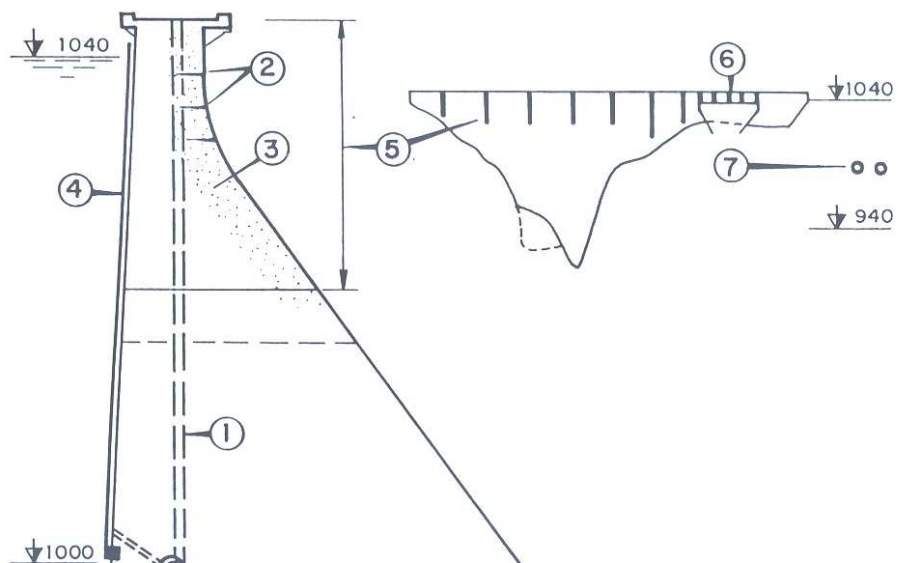
- o realizzazione di un nuovo scarico profondo indipendente dalla diga
- o iniezione delle fessure
- o impermeabilizzazione del paramento di monte con una membrana in PVC
- o esecuzione di tagli verticali, parziali, nella struttura

Sono stati programmati 8 tagli circa ogni 30 m, per una profondità di 20÷30 m, con un cavo di 10 mm di diametro.

I tagli sono stati programmati in più stagioni, così da sfruttare il basso livello dell'invaso alla fine dell'inverno. Si è deciso di approfondire i tagli verso la spalla sinistra in quanto è la zona più compressa e deformata.

In Figura 21 e Figura 22 è riportato lo schema dei tagli che sono iniziati nella primavera del 1995 e si sono conclusi nel 1997.

In corrispondenza dello scarico di superficie si è registrato un recupero delle deformazioni di circa 20 mm (8 mm nel 1995, 5 mm nel 1996 e da 3 a 5 mm nel 1997). Complessivamente il ritorno verso valle delle deformazioni ha rappresentato circa 10 anni di evoluzione del rigonfiamento che, tuttavia, pur con una attenuazione, continua [16].



- (1) Drains existants
- (2) Fissures ouvertes
- (3) Injections de remplissage
- (4) Membrane étanche PVC
- (5) Sciages au fil diamanté
- (6) Ancien évacuateur
- (7) Nouvel évacuateur

- (1) Existing drainage shafts
- (2) Open cracks
- (3) Cement grouting zone
- (4) Impervious PVC membrane
- (5) Diamond wire slot cutting
- (6) Original spillway
- (7) New spillway

Figura 21. Diga di Chambon – Sezione e vista da valle, con i tagli [15]

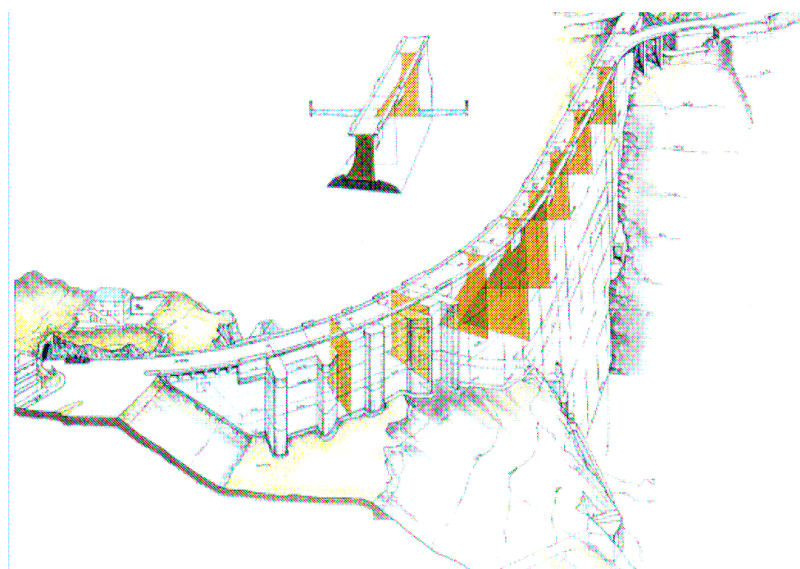
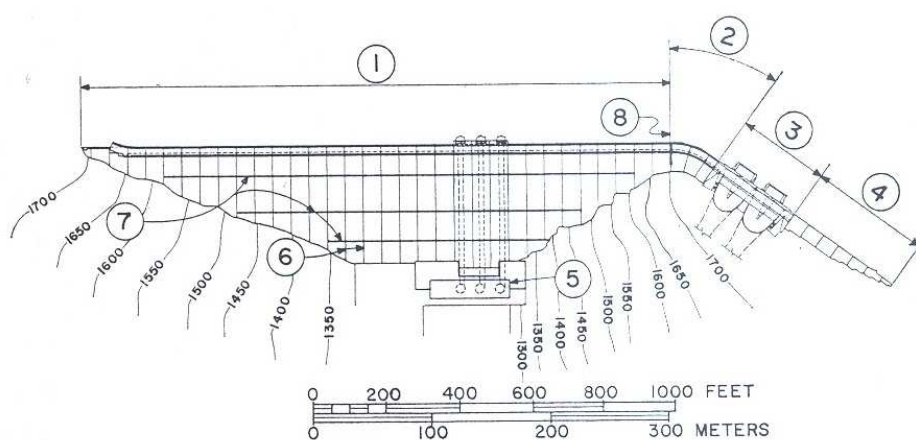


Figura 22. Diga di Chambon – Schema dei tagli [16]

➤ Fontana (USA)

La Diga di Fontana [17] [18], negli Stati Uniti d'America (Tennessee), è del tipo a gravità massiccia, realizzata tra il 1942 ed il 1945.

La parte sinistra della diga, dove si trova lo scarico di superficie, è collegata al corpo centrale tramite un elemento curvilineo, come si può vedere nelle planimetria delle opere di Figura 23.



GENERAL PLAN OF FONTANA DAM

(PLAN GÉNÉRAL DU BARRAGE DE FONTANA)

- | | |
|---|---|
| (1) Main dam. | (1) <i>Barrage principal.</i> |
| (2) Blocks affected by cracking (blocks 33, 34 and 35). | (2) <i>Plots fissurés (blocs 33, 34 et 35).</i> |
| (3) Main spillway. | (3) <i>Évacuateur de crue.</i> |
| (4) Left abutment blocks. | (4) <i>Culée de gauche.</i> |
| (5) Powerhouse. | (5) <i>Centrale électrique.</i> |
| (6) Transverse contraction joints. | (6) <i>Joints transversaux de contraction.</i> |
| (7) Longitudinal contraction joints. | (7) <i>Joints longitudinaux de contraction.</i> |
| (8) Expansion slot cut at this joint. | (8) <i>Créneau de dilatation ouvert à ce joint.</i> |

Figura 23. Diga di Fontana - planimetria [17]

Nel 1972, durante un'ispezione della galleria di raccolta dei drenaggi, si è notata una fessura che attraversava la galleria con una apertura di 0,6 mm proprio in concomitanza dell'elemento curvilineo della struttura.

Gli studi condotti sullo sbarramento hanno individuato come causa di questa fessurazione:

- una espansione del calcestruzzo dovuta al fenomeno della reazione alcali-aggregato;
- l'elevata variazione termica stagionale cui è soggetta la struttura a causa della sua esposizione.

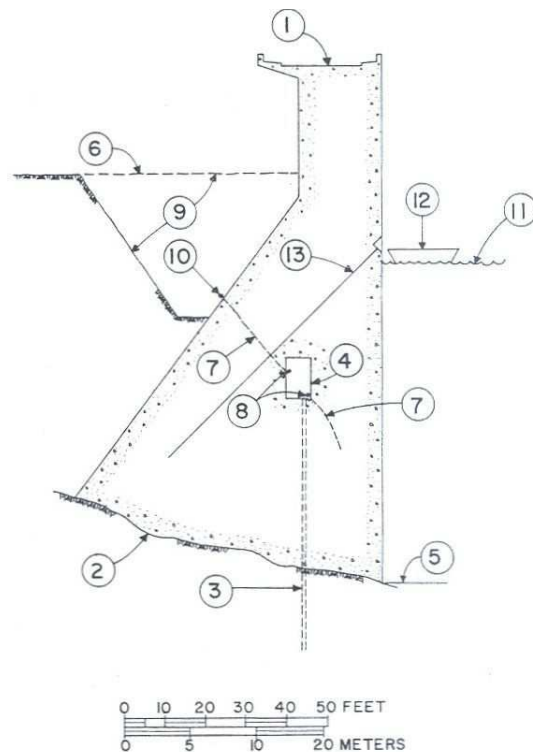
L'aumento volumetrico del calcestruzzo, contrastato longitudinalmente dalla fondazione dell'opera, nella zona meno vincolata rappresentata dalla curva planimetrica della diga ha potuto portare alla formazione della fessura in questione.

Venne rimosso parte del terreno che ricopriva il paramento di valle (Figura 24) per constatare che la fessura raggiungeva il paramento di valle della diga. Successivamente, come primissimo intervento, durante le stagioni calde si è provveduto a bagnare il paramento di valle con acqua fredda, per ridurre le escursioni termiche cui era soggetto il calcestruzzo.

L'attento monitoraggio della fessura ha portato a rilevare un aumento di apertura della stessa in concomitanza dell'innalzamento delle temperature, fatto che ha portato il Concessionario dello sbarramento a decidere di intervenire urgentemente per garantire la stabilità della parte alta dei tre conci interessati dalla discontinuità.

Il primo intervento fu quello di mettere in opera 25 tiranti per garantire nuovamente la continuità strutturale dell'opera; congiuntamente a questa lavorazione venne iniettata la fessura sia per ripristinare la resistenza al taglio che per prevenire eventuali movimenti dei conci durante il tensionamento dei tiranti.

In Figura 24 si può vedere una sezione della diga riportante la fessura e la disposizione dei tiranti.



TYPICAL SECTION THROUGH CRACKED BLOCKS
(COUPE TYPIQUE DES BLOCS FISSURÉS)

- | | |
|--|--|
| (1) Top of dam elevation 1,727 feet. | (1) Sommet du barrage - cote 526,4 m. |
| (2) Rock foundation. | (2) Fondation rocheuse. |
| (3) Foundation drains. | (3) Drain de fondation. |
| (4) Drainage gallery. | (4) Galerie de drainage. |
| (5) Elevation varies. | (5) Cote variable. |
| (6) Original surface of fill. | (6) Niveau de remblai d'origine. |
| (7) Crack. | (7) Fissure. |
| (8) Crack gages in drainage gallery. | (8) Jauge d'ouverture de la fissure dans la galerie de drainage. |
| (9) Earth excavation. | (9) Excavation. |
| (10) Crack gages on downstream face. | (10) Jaugeage de la fissure sur le parement aval. |
| (11) Pool maintained at elevation 1,680 feet during drilling for posttensioning. | (11) Réservoir maintenu à la cote 512,1 m pendant le forage de post-tension. |
| (12) Drill barge. | (12) Péniche de travail. |
| (13) Posttensioning tendons. | (13) Câble de post-tension. |

Figura 24. Diga di Fontana - sezione in corrispondenza della fessura [17]

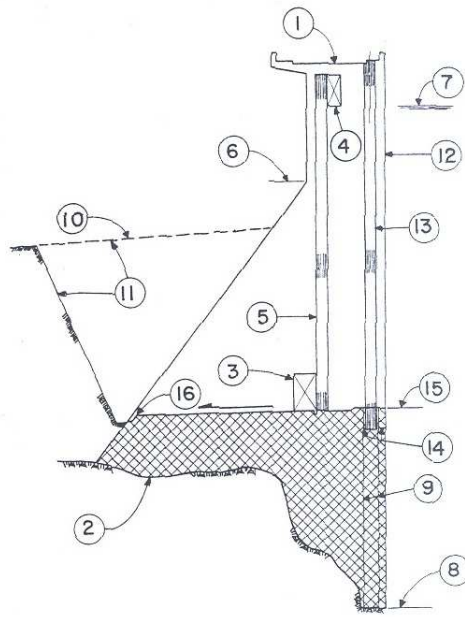
Misure dello stato di sforzo nella struttura, eseguite tramite sovracarotaggi, hanno evidenziato un elevato stato di compressione nella parte alta con serraggio dei giunti di contrazione.

Tramite una modellazione ad elementi finiti della struttura si è valutato quale potesse essere il migliore intervento per consentire il rilascio di queste tensioni.

Inizialmente si è pensato all'esecuzione di più tagli trasversali della parte alta della struttura. Una attenta analisi tecnico-economica evidenziò che il vantaggio in termini di riduzione di sforzi derivante dall'esecuzione di più tagli non era giustificabile, a fronte dei considerevoli costi e tempi realizzativi. Sulla scorta di queste considerazioni il Concessionario decise di eseguire un solo taglio di 30 m di altezza a partire dal piano di coronamento, in prossimità del giunto di contrazione tra il corpo diga e l'elemento curvilineo.

Inizialmente si pensò di eseguire questo intervento con filo diamantato, ma per potere garantire una maggiore apertura del taglio si optò per l'esecuzione dello stesso con perforazioni accostate e secanti del diametro di 127 mm. In Figura 25 si può vedere la superficie interessata dal taglio.

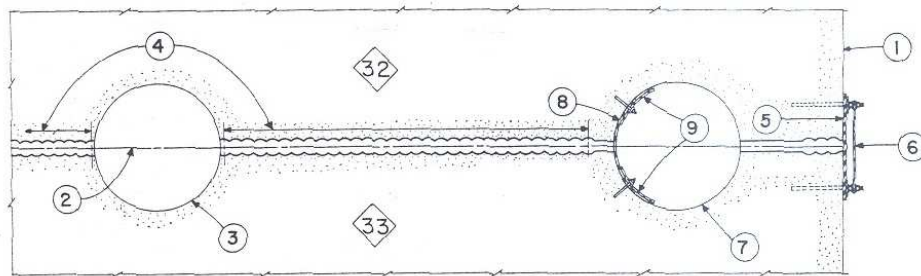
Data la sovrapposizione dei carotaggi la minima apertura garantita del taglio è stata di 76 mm; in Figura 26 si può vedere il particolare del taglio con i carotaggi sovrapposti.



SECTION AT SLOT
(COUPE AU NIVEAU DU CRÉNEAU)

- | | |
|--|---|
| (1) Top of dam elevation 1,727 feet. | (1) Sommet du barrage - cote 526,4 m. |
| (2) Rock foundation. | (2) Fondation rocheuse. |
| (3) Drainage gallery. | (3) Galerie de drainage. |
| (4) Inspection gallery. | (4) Galerie de visite. |
| (5) 3 foot diameter inspection shaft. | (5) Puits d'inspection (0,9 m de diamètre). |
| (6) Elevation 1,695.03 feet. | (6) Cote 516,66 m. |
| (7) Maximum headwater elevation 1,715 feet. | (7) Hauteur maximum du réservoir 522,73 m. |
| (8) Elevation 1,580 ± feet. | (8) Cote approximative 480 m. |
| (9) Original copper waterstops. | (9) Joints d'étanchéité d'origine en cuivre. |
| (10) Original surface of fill. | (10) Niveau de remblai d'origine. |
| (11) Earth excavation. | (11) Excavation. |
| (12) Primary seal on upstream face. | (12) Élément d'étanchéité primaire sur le parement amont. |
| (13) Secondary seal in drilled 3 foot diameter hole. | (13) Élément d'étanchéité secondaire (injecté) dans un trou de forage de 0,9 m de diamètre. |
| (14) Connection of primary and secondary seals to original waterstops. | (14) Jonction des éléments primaires et secondaires d'étanchéité aux joints d'étanchéité d'origine. |
| (15) Bottom of slot, elevation 1,634 feet. | (15) Fond du créneau - cote 498 m. |
| (16) Bottom of slot, elevation 1,632 feet. | (16) Fond du créneau - cote 497,4 m. |

Figura 25. Diga di Fontana - superficie tagliata [17]



PLAN ABOVE BOTTOM OF SLOT SHOWING
PRIMARY AND SECONDARY SLOT SEALS
(PLAN, AU DESSUS DU FOND DU CRÉNEAU, MONTRANT LES
ÉLÉMENTS D'ÉTANCHÉITÉ PRIMAIRE ET SECONDAIRE)

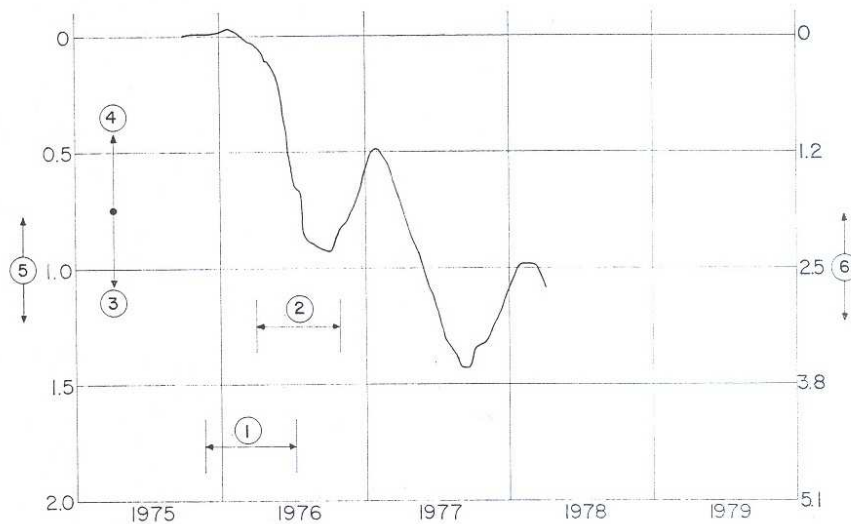
- | | |
|---|---|
| (1) Upstream face of dam. | (1) <i>Parement amont du barrage.</i> |
| (2) Contraction joint between blocks. | (2) <i>Joint de contraction entre blocs.</i> |
| (3) Original 3 foot diameter inspection shaft. | (3) <i>Puits de visite d'origine (0,9 m de diamètre).</i> |
| (4) Expansion slot cut by overlapping 5 inch diameter percussion drilled holes. | (4) <i>Créneau de dilatation ouvert par chevauchement de forages de 127 mm de diamètre.</i> |
| (5) Primary rubber seal. | (5) <i>Caoutchouc d'étanchéité primaire</i> |
| (6) Protective steel plate. | (6) <i>Plaque protectrice en acier.</i> |
| (7) Drilled 3 foot diameter hole. | (7) <i>Trou foré de 0,9 m de diamètre.</i> |
| (8) Secondary rubber seal. | (8) <i>Caoutchouc d'étanchéité secondaire.</i> |
| (9) Seal retainer plates. | (9) <i>Plaques de maintien du caoutchouc d'étanchéité.</i> |

Figura 26. Diga di Fontana - planimetria dei carotaggi [17]

In Figura 26 si può vedere anche il particolare dei due sistemi di impermeabilizzazione del taglio eseguiti in prossimità del paramento di monte e all'interno di un pozzo di diametro 0,9 m, eseguito durante i lavori di taglio.

All'interno del cunicolo è stato applicato un nastro di gomma ancorato al calcestruzzo tramite piastre metalliche, mentre sul paramento di monte, previa regolarizzazione delle superfici con prodotti epossidici, è stato adottato anche qui un doppio strato di nastro di gomma ancorato e allo stesso tempo protetto tramite una placca metallica.

La successiva campagna di misurazioni ha evidenziato un serraggio del taglio maggiore rispetto alle previsioni dei programmi di calcolo. Come si può vedere in Figura 27 si è infatti avuta una richiusura del taglio di quasi la metà in meno di due anni (il taglio eseguito aveva una apertura iniziale minima di 76 mm).



CLOSING AND OPENING CYCLES
OF EXPANSION SLOT NEAR TOP
OF DAM
(CYCLES D'OUVERTURE ET DE FERMETURE DU
CRÉNEAU DE DILATATION PRÈS DU SOMMET DU BARRAGE)

- | | |
|---|--|
| (1) Cutting of slot. | (1) Découpage du créneau. |
| (2) Final period of warm-season spraying. | (2) Période finale d'arrosage par temps chaud. |
| (3) Closing of expansion slot. | (3) Fermeture du créneau de dilatation. |
| (4) Opening of expansion slot. | (4) Ouverture du créneau de dilatation. |
| (5) Inches. | (5) Pouces. |
| (6) Centimeters. | (6) cm. |

Figura 27. Diga di Fontana - misurazioni dell'apertura del taglio [17]

Nell'estate del 1983 la parte superiore del taglio eseguito era completamente serrata, per questa ragione lo stesso anno è stata ripristinata l'apertura con lo stesso sistema a carotaggi sovrapposti per un'altezza di 15 m.

Sempre a causa del serraggio del giunto nel 1998 venne nuovamente eseguito il taglio per poterlo riaprire. Data l'onerosità tecnica del sistema a carotaggi sovrapposti, e soprattutto la difficoltà nel garantire la verticalità dei fori, nel 1998 si è preferito impiegare la tecnica del taglio con filo diamantato anche a fronte degli ultimi sviluppi avuti da questo sistema di taglio.

4.2.2. L'ESPERIENZA ITALIANA

L'esperienza Italiana presentata in questo rapporto riguarda esclusivamente la diga del Poggia [2], anche se attualmente sono in corso dei tagli anche su un'altra diga, quella di Piantalesio. Di quest'ultima di potranno disporre di informazioni solo in un prossimo futuro.

La Diga del Poggia è del tipo ad elementi cavi, con spalle a gravità; quella in destra piega verso monte per seguire la roccia di imposta più superficiale. Lo sbarramento è stato ultimato nel 1950.

In Figura 28 si riporta la planimetria dell'opera.

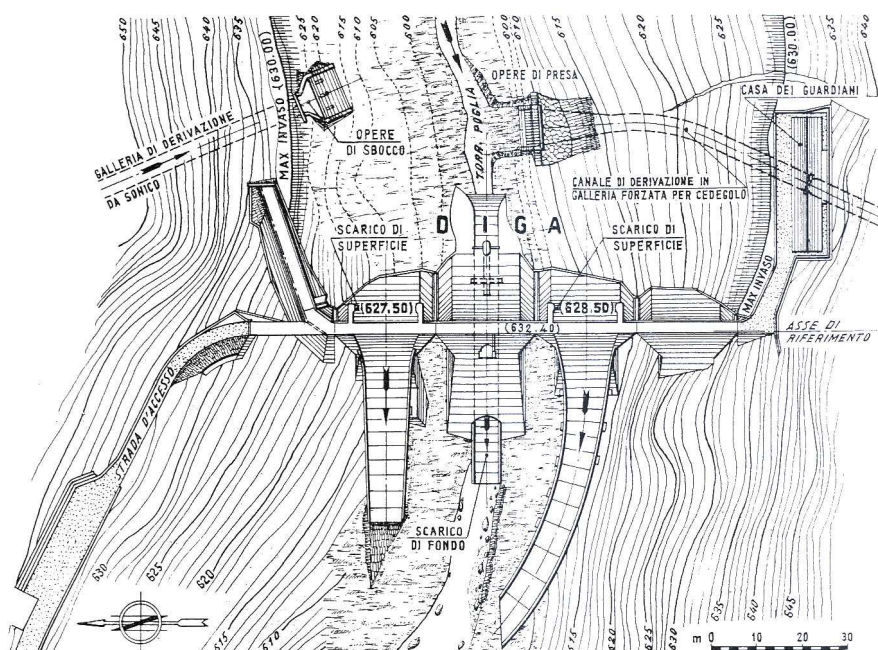


Figura 28. Diga del Poggia - planimetria

Lo studio delle misure rilevate ha messo in evidenza che, a partire dal 1967 (cioè 15 anni dopo la messa in esercizio) si veniva producendo una deformazione anelastica della struttura, progressiva nel tempo. In particolare, con riferimento alla Figura 29, alla Figura 30 ed alla Figura 31, un innalzamento degli elementi e

uno spostamento verso valle della loro cresta, valutabili per l'elemento centrale (quello più alto) rispettivamente in 1 mm/anno e 0,2 mm/anno.

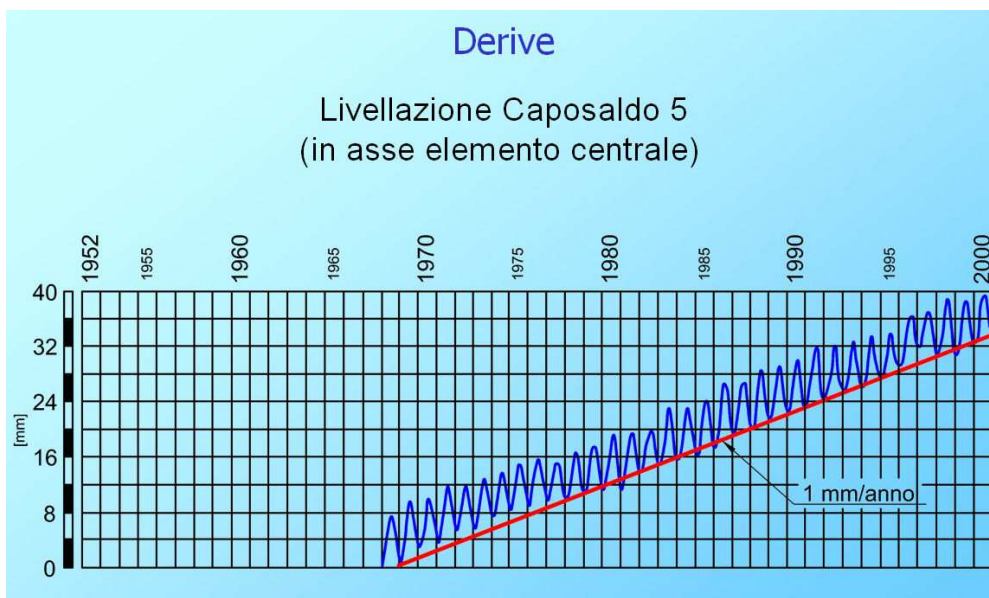


Figura 29. Diga del Poglia - livellazione caposaldo 5

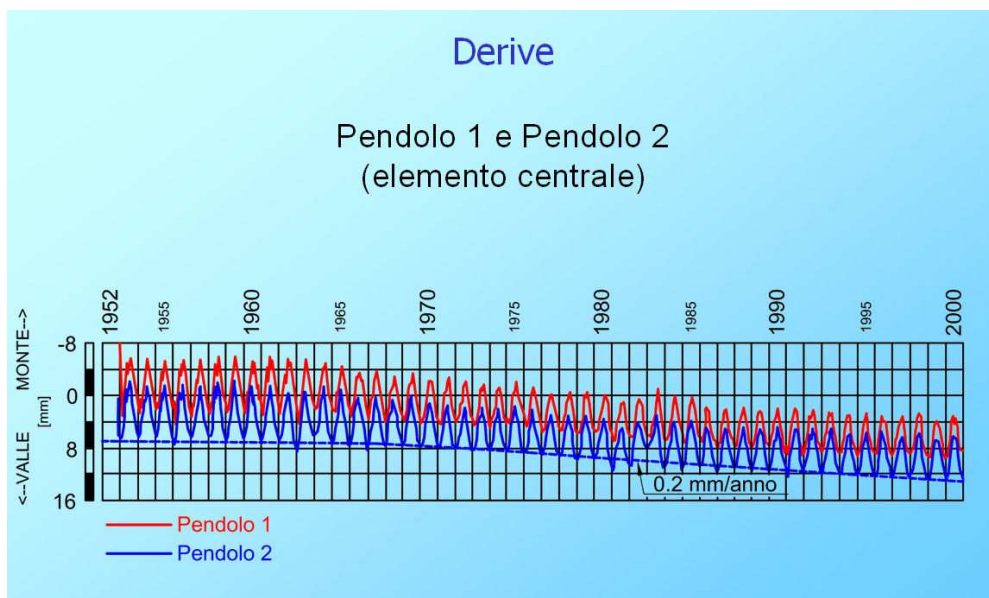


Figura 30. Diga del Poglia – pendoli 1 e 2

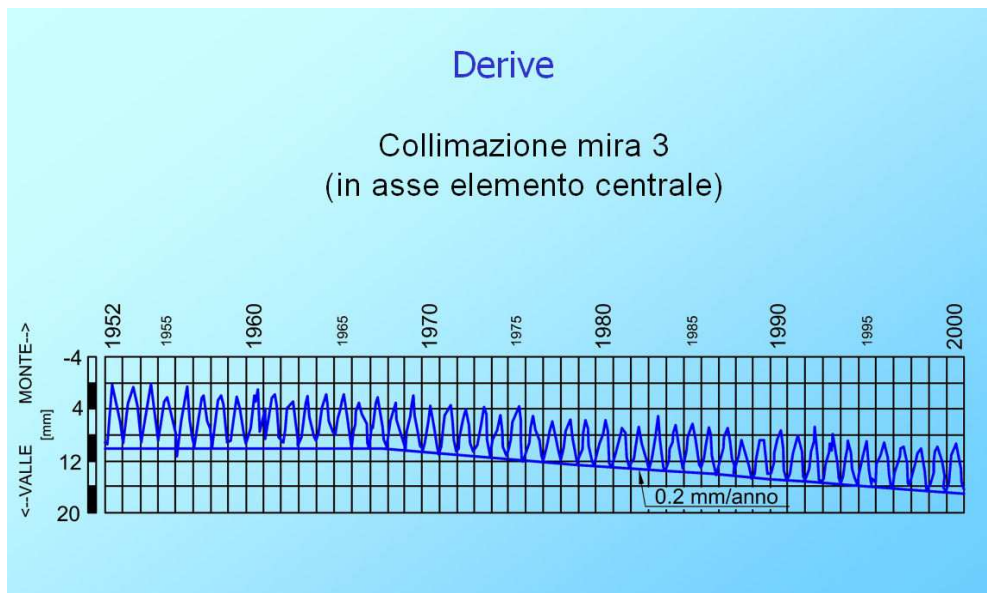


Figura 31. Diga del Poggia – collimazione mira 3

Per stabilire le cause della deformazione, dopo un'iniziale indagine geologica che ha escluso effetti di questa origine, si è iniziato a valutare la possibilità di un fenomeno espansivo del calcestruzzo.

Le indagini svolte hanno confermato nel 1996 la presenza di una reazione alcali-aggregati nel calcestruzzo della diga.

A seguito di questa determinazione sono stati eseguiti numerosi studi e modellazioni numeriche, atte a simulare l'evoluzione a lungo termine del fenomeno in atto.

In particolare sono state eseguite analisi con l'ausilio di un modello numerico in cui il fenomeno espansivo è stato simulato con una legge di espansione in funzione inversa dello sforzo di compressione [19]. Sono stati così riprodotti sia lo stato di sforzo di compressione in direzione spalla-spalla (responsabile della chiusura dei giunti) che le trazioni orizzontali in direzione monte-valle all'interno delle cavità, che corrispondono alla fessurazione ad andamento verticale ivi presente.

Lo stesso modello numerico impiegato alla definizione analitica del comportamento strutturale della diga del Poggia, è stato utilizzato anche per la valutazione dell'effetto conseguibile con la riapertura dei giunti di costruzione. Il taglio dei giunti è stato simulato in sequenza, secondo quanto previsto per la fase operativa.

Tutti gli studi eseguiti hanno indicato come intervento da adottarsi quello di riapertura dei giunti di contrazione (Figura 32), con obiettivo il ripristino del funzionamento a "conci isolati" degli elementi della diga, attraverso l'eliminazione delle consistenti compressioni attive nel senso spalla-spalla ed il recupero delle deformazioni, in particolare dell'elemento d'angolo in destra, in corrispondenza della discontinuità lineare del coronamento (Figura 28) ed all'interno delle cavità della diga.

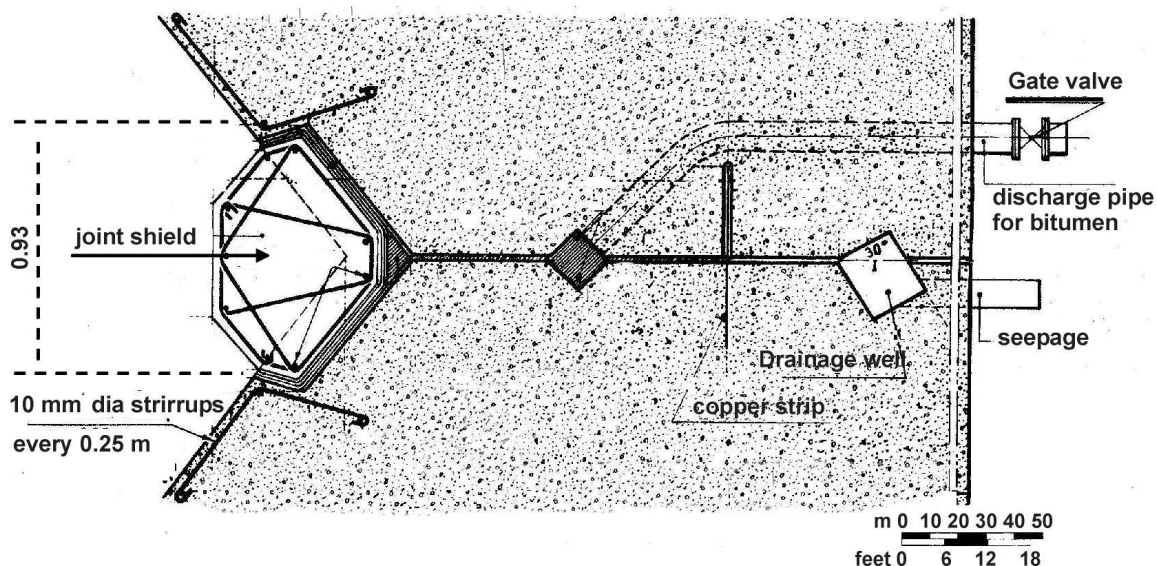


Figura 32. Diga del Poggia – giunto di contrazione

Per il taglio dei giunti si è deciso di operare con la tecnica del filo diamantato. Preventivamente all'esecuzione dei lavori sono stati installati nuovi strumenti di misura per potere controllare l'evoluzione delle deformazioni dello sbarramento durante le operazioni di taglio.

Più precisamente sono stati installati un pendolo diritto in prossimità dell'elemento d'angolo in sponda destra ed estensimetri a lunga base nel concio centrale per controllare le deformazioni durante i tagli e dilatometri automatici sui giunti per verificare la richiusura dei giunti a seguito dei tagli.

Sempre prima dell'inizio dei tagli sono state stabilite soglie di attenzione e soglie di allarme per le misure rilevate in automatico.

Per il taglio di ogni giunto è stata preventivamente idrodemolita la trave coprigiunto (Figura 32) ed è stato eseguito un carotaggio Ø 80 mm alla base della superficie del giunto da tagliare entro cui far passare il cavo (Figura 33). Per quanto concerne il macchinario del taglio sono stati montati a coronamento i binari su cui si muoveva la macchina che trainava il cavo ed imprimeva allo stesso una velocità di 25 m/s; quest'ultima era collegata ad una centralina oleodinamica.

Sulla base dell'esperienza dell'Eugio (paragrafo 4.1), per ridurre il pericolo di formazione di "scaglie" tra il vecchio giunto ed il taglio, sono state montate due cremagliere, una sul paramento di monte e una su quello di valle, che seguivano il percorso del giunto esistente, lungo queste ultime correavano due pulegge che guidavano il filo garantendo che sui paramenti il taglio avvenisse lungo il giunto. In Figura 34 si può vedere una delle cremagliere in questione.

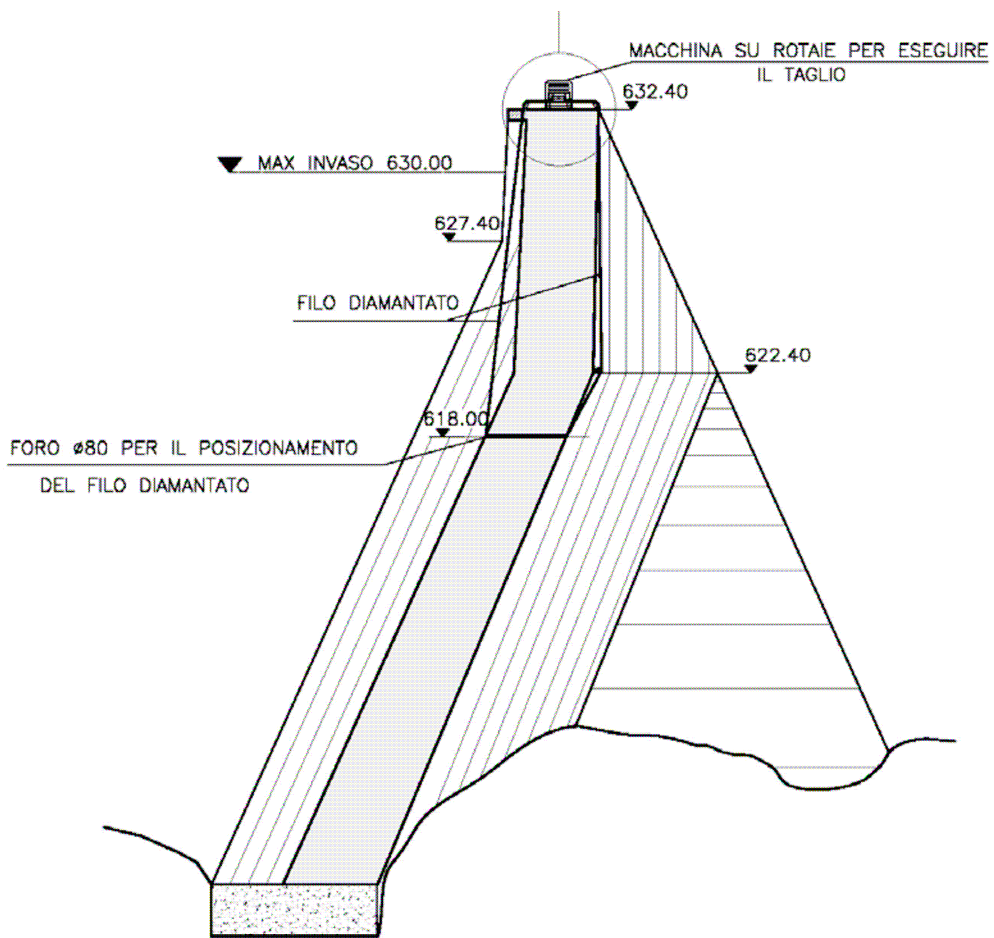


Figura 33. Diga del Poggia – sezione della diga in corrispondenza del giunto, con posizionamento del filo diamantato



Figura 34. Diga del Poggia – binario a guida del filo

In Figura 35 si può vedere il macchinario per il taglio installato a coronamento, mentre in Figura 36 si può vedere la puleggia mobile sul paramento di valle.



Figura 35. Diga del Poggia – macchina per il taglio con filo diamantato

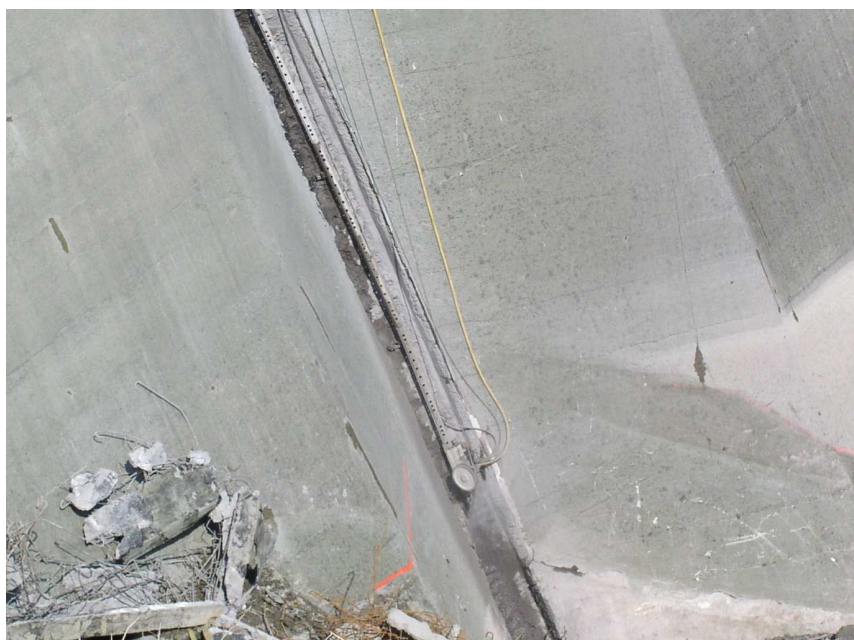


Figura 36. Diga del Poglia – taglio di un giunto

In Figura 37 si può vedere un giunto completamente riaperto a fine taglio.



Figura 37. Diga del Poglia – un giunto tagliato

La sequenza dei tagli è stata studiata e modellata; essa è stata rispettata in fase di esecuzione.

Il taglio dei giunti più alti è stato previsto ed eseguito in due fasi per ridurre al minimo il fuori esercizio dell'invaso. La prima fase dei tagli infatti è stata realizzata da quota 618 m s.m., corrispondente alla minima quota di vaso che consente l'esercizio della centrale.

In Figura 38 è riportata una vista da valle della diga con indicata la numerazione dei giunti e la sequenza dei tagli.

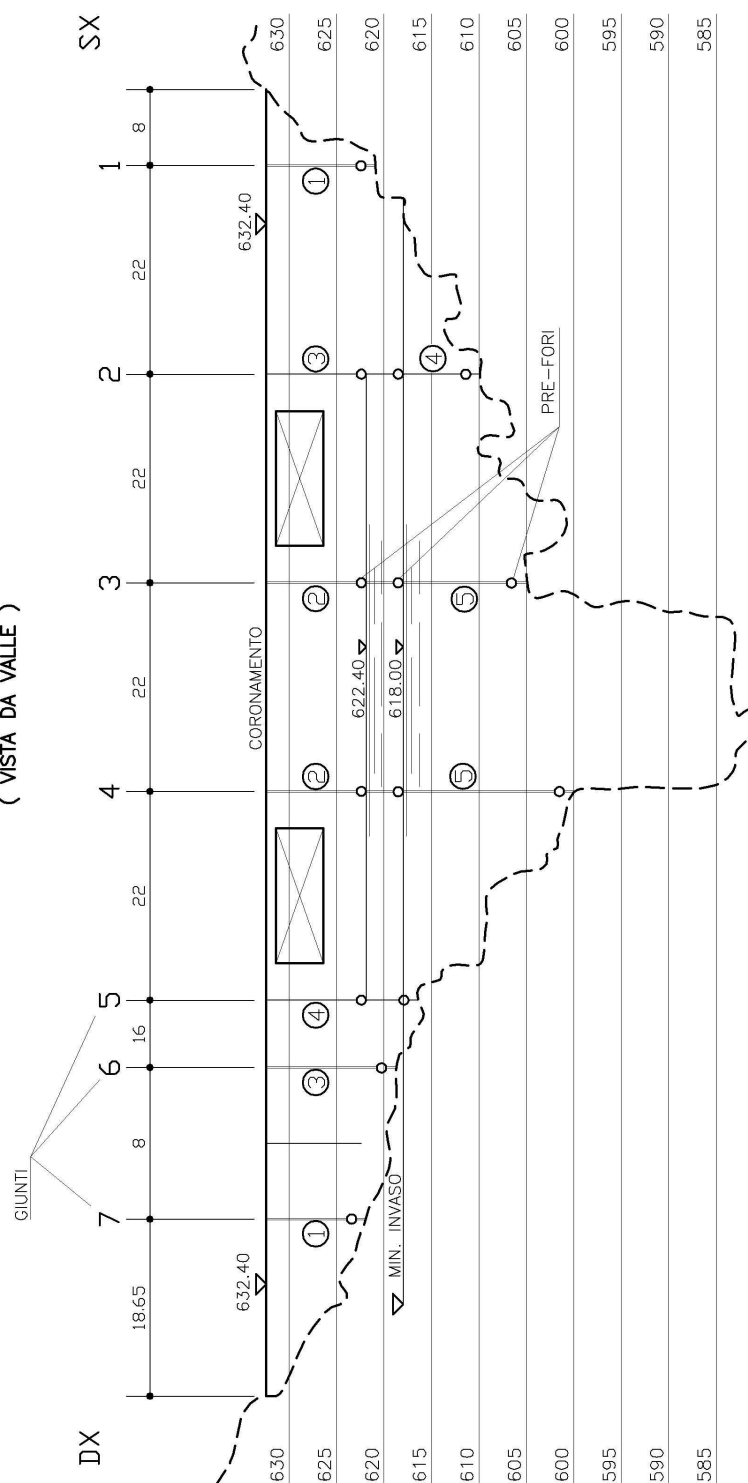
Prima di ogni taglio sono state installate tutte le basi dei dilatometri previste lungo il paramento e nel pozzetto a coronamento. Appena il taglio superava le basi veniva installato il dilatometro che iniziava a monitorare la deformazione del giunto. Nei primi tagli sono stati installati tre dilatometri nel pozzetto, per monitorare la chiusura del giunto e gli spostamenti differenziali altimetrici e monte-valle fra i conci contigui; oltre a questi ne sono stati posizionati diversi anche lungo il paramento di valle.

Una volta superata la fase iniziale di messa a punto dei sistemi di taglio e di controllo, i lavori si sono svolti regolarmente e speditamente, senza inconvenienti degni di rilievo, e sono stati ultimati in meno di un mese e mezzo (maggio 2005). Si è avuta una produzione di circa 2 m²/ora.

Dal momento che la reazione di espansione del calcestruzzo avrebbe continuato a progredire anche dopo i tagli, è stato installato, a tergo dell'impermeabilizzazione della trave coprigiunto, un circuito per consentire l'esecuzione di tagli futuri senza danneggiare le travi e, soprattutto, senza dovere svasare. È stato infatti posto in opera un tubo in PVC ϕ 30 mm, protetto da un angolare metallico, entro cui in futuro potrà essere posizionato il filo diamantato. Si può vedere lo schema in questione in Figura 39.

FASI DI TAGLIO DEI GIUNTI DI COSTRUZIONE

SEZIONE LONGITUDINALE
(VISTA DA VALLE)



④ Successione esecutiva dei tagli

Figura 38. Diga del Poggio – fasi di taglio dei giunti

GIUNTO A TENUTA E IMPERMEABILIZZAZIONE

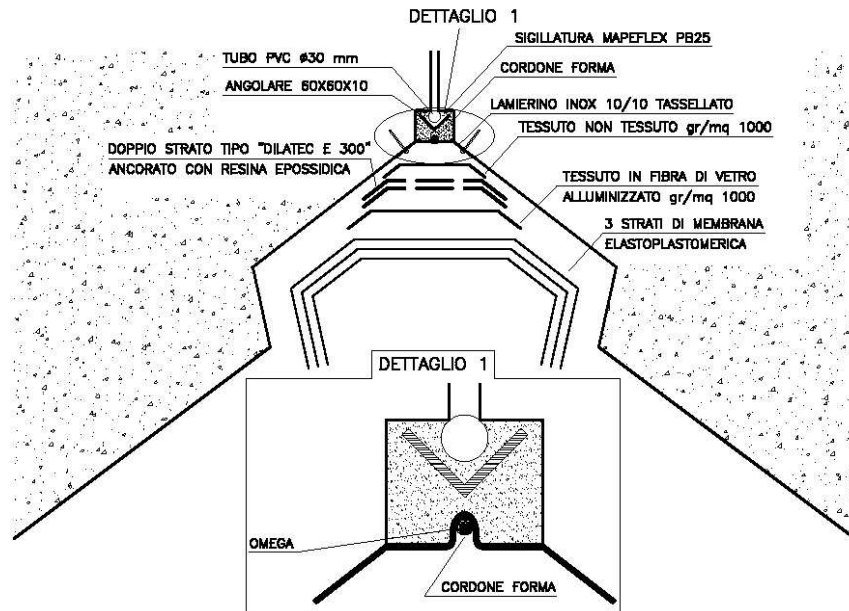


Figura 39. Diga del Poglià – sistema di impermeabilizzazione dei giunti

Successivamente è stata ricostruita la trave coprigiunto e si è proceduto all'impermeabilizzazione del paramento di monte con un rivestimento elastomerico.

A dimostrazione dell'efficacia degli interventi eseguiti, si riportano i diagrammi più significativi dell'impianto di monitoraggio. In Figura 40 si può vedere il diagramma relativo ai calibri estensimetrici removibili 2C e 3C (al coronamento, a cavallo dei giunti n. 2 e n. 3) che fa vedere come il taglio abbia consentito la piena ripresa del "respiro" stagionale dei giunti, speculare alle vicende termiche. Il periodo di esecuzione dei tagli è riconoscibile con l'abbattimento dell'invaso.

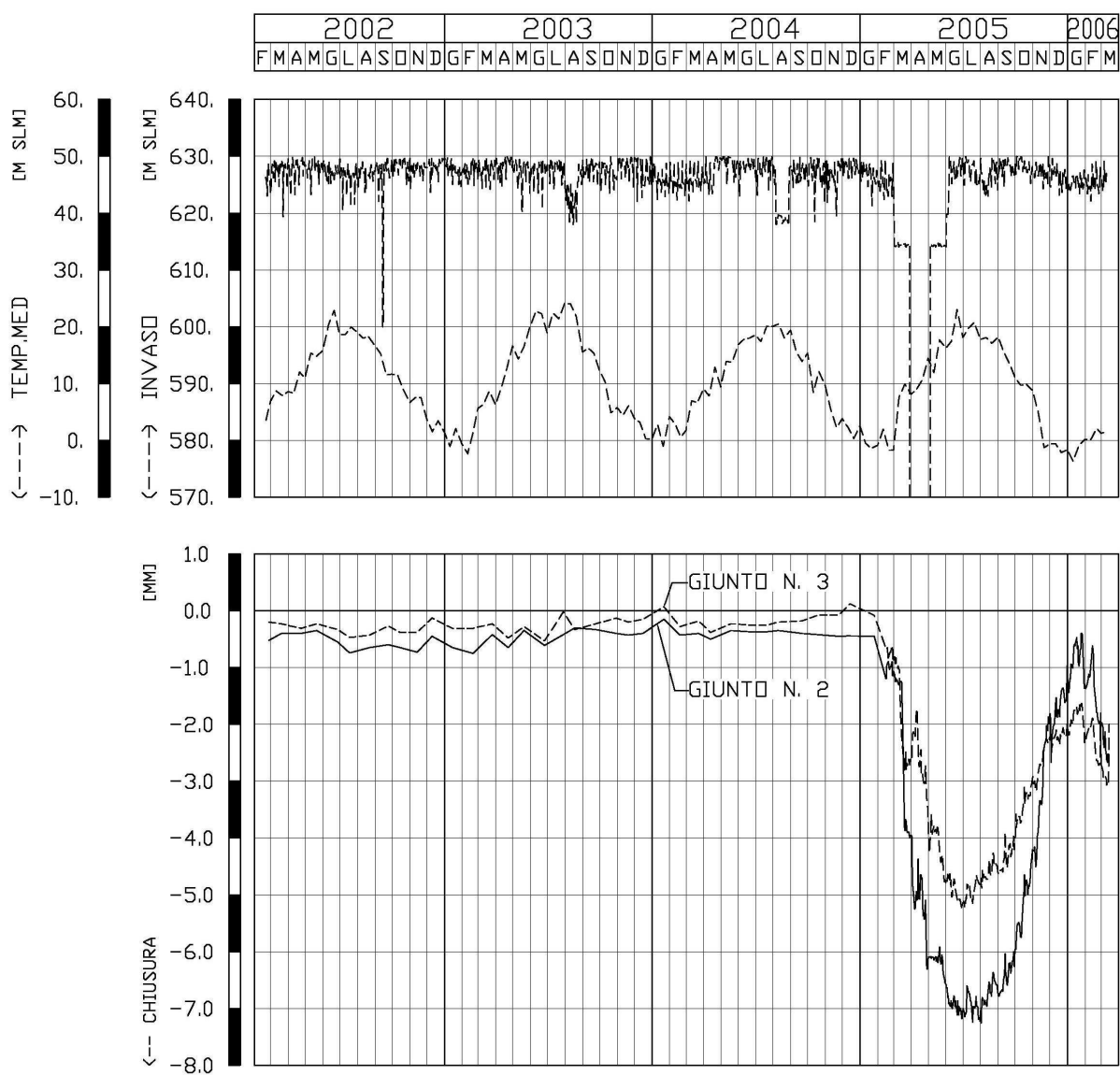


Figura 40. Diga del Poggia – estensimetri giunti 2 e 3

In Figura 41 si riporta invece il diagramma dei movimenti, rilevati in automatico al coronamento, a cavallo dei giunti 1, 2, 3, 4, con l'indicazione della data di taglio (gli indici A e B indicano parte alta e parte bassa del giunto).

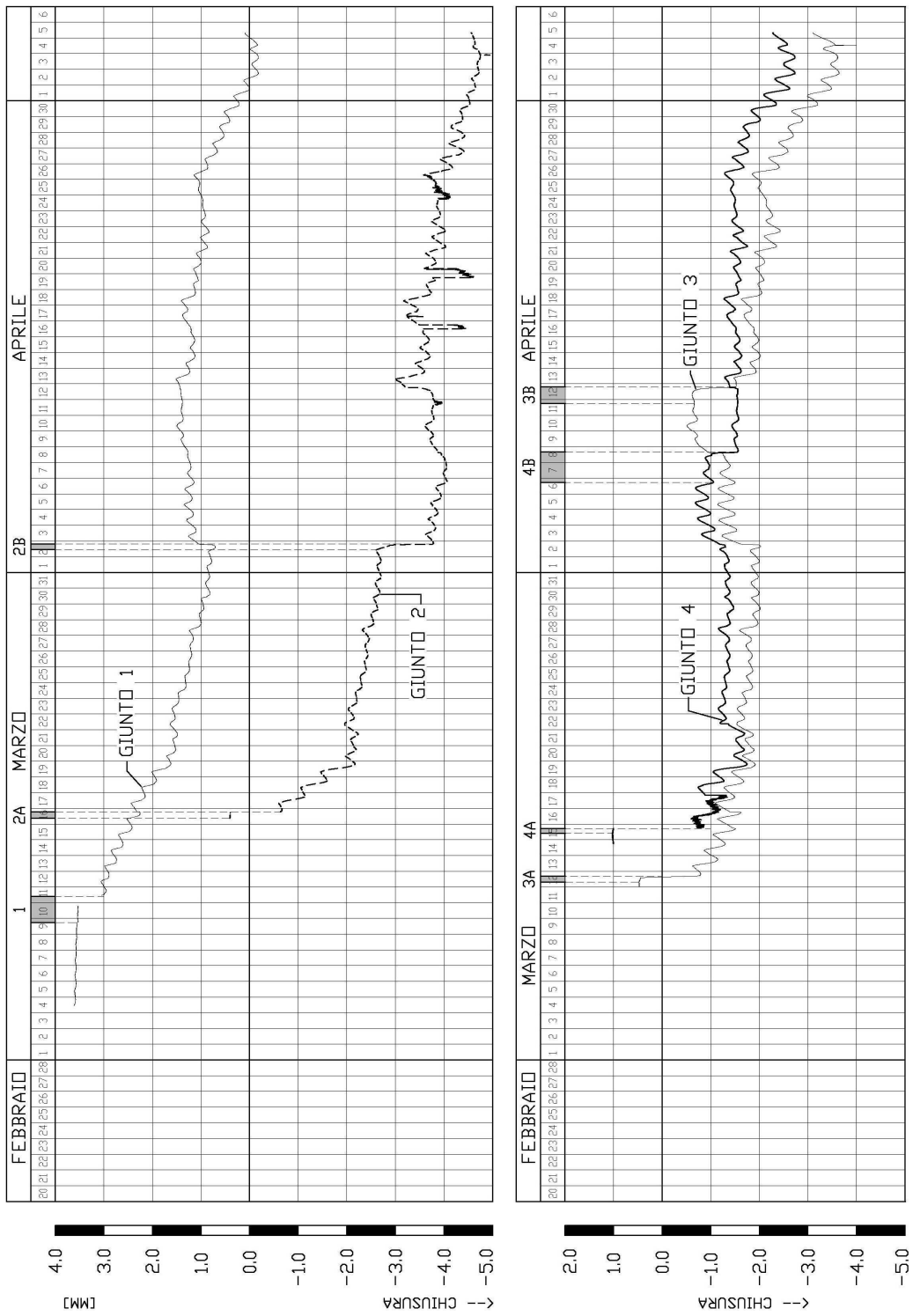


Figura 41. Diga del Poggia – estensimetri giunti 1, 2, 3 e 4

Vi si nota l'immediato recupero elastico (mediamente dell'ordine di 1,5 mm).

E' interessante rilevare l'influenza del taglio della parte bassa del giunto su quelli contigui:

- con il taglio 2B, eseguito il 02.04.05, il giunto 2 si richiude elasticamente di 1,2 mm, e contemporaneamente i giunti 1, 3 e 4 si aprono rispettivamente di 0,4 0,6 e 0,2 mm;
- con il taglio 3B, eseguito il 12.04, il giunto 3 si richiude di 1 mm, quelli 2 e 4 si aprono di 0,7 e 0,3 mm rispettivamente.

Infatti i giunti a coronamento sono già stati tutti aperti e quindi la loro ampiezza totale non può variare: se uno si chiude, altri debbono aprirsi.

Al termine degli interventi di taglio dei giunti è stata eseguita una serie di misure dello stato tensionale in situ nel calcestruzzo della diga; le misure sono state eseguite in vicinanza di analoghe prove eseguite nel 2000, in analoghe condizioni termiche ambientali, da parte degli stessi specialisti: ci si è posti perciò nelle condizioni idonee per effettuare il confronto dello stato di sforzo prima e dopo i tagli. Da queste prove è emerso come i tagli abbiano determinato uno "scarico" dello stato tensionale accumulatosi nella struttura a causa dell'espansione del calcestruzzo. Basti dire che in prossimità del giunto n. 1, in sponda sinistra, si è passati da sforzi di compressione di 7,82 MPa (pre-taglio) a 0,92 MPa (post-taglio) e in prossimità dell'asse del concio centrale da sforzi di compressione di 2,94 MPa (pre-taglio) a ~ zero (post-taglio).

4.3. DIFFICOLTÀ DI PREVISIONE CONNESSE CON IL TAGLIO

Nella maggior parte dei casi esaminati, il confronto tra le misure acquisite sulle dighe dopo l'esecuzione dei tagli ed i calcoli ottenuti con un modello numerico, realizzato a supporto della interpretazione del comportamento strutturale dell'opera, prima e dopo i tagli, mostra differenze non trascurabili.

In qualche caso, addirittura, è capitato di prevedere aperture del taglio mentre le misure ne hanno mostrato la chiusura [11]. Ciò a testimonianza della complessità del problema in oggetto. E' inoltre difficile prevedere quantitativamente sia la chiusura elastica (a breve termine) dei tagli nel calcestruzzo compresso dall'espansione AAR che, soprattutto, quella a lungo termine. Quest'ultima, infatti, dipende, oltre che dallo stato di sforzo nella struttura e dai suoi vincoli, anche dagli effetti termici, dall'espansione chimica e dai fenomeni viscosi (di creep e di rilassamento) del calcestruzzo stesso.

Nei modelli costitutivi del calcestruzzo massivo si assume generalmente il principio di sovrapposizione degli effetti per cui la deformazione totale è somma di vari contributi:

$$\epsilon_{TOT} = \epsilon_E + \epsilon_{CR} + \epsilon_T + \epsilon_I + \epsilon_{AAR}$$

dove gli indici utilizzati rappresentano

E: componente elastica dovuta ai carichi applicati

CR: componente dovuta al comportamento viscoelastico del calcestruzzo (creep)

T: componente termica

I: componente data dal rigonfiamento dovuto all'acqua o al ritiro

AAR: componente dovuta alla reazione alcali-aggregato

Occorre tuttavia riconoscere che l'espansione da AAR è collegata alla temperatura, alla umidità ed agli sforzi indotti dai vincoli della struttura.

Un problema fondamentale è poi anche come trasformare le deformazioni negli sforzi quando la microfessurazione riduce il modulo elastico del calcestruzzo (e le prestazioni meccaniche a trazione e compressione), aumentando allo stesso tempo il fenomeno del creep.

In questa ottica si rivelano molto importanti i test di laboratorio su provini prelevati dalla struttura, i cui risultati servono per calibrare il modello numerico.

In Figura 42 è riportato un grafico che mostra la variazione della deformazione ε di un provino di calcestruzzo soggetto ad una compressione uniforme σ_0 che successivamente viene rimossa.

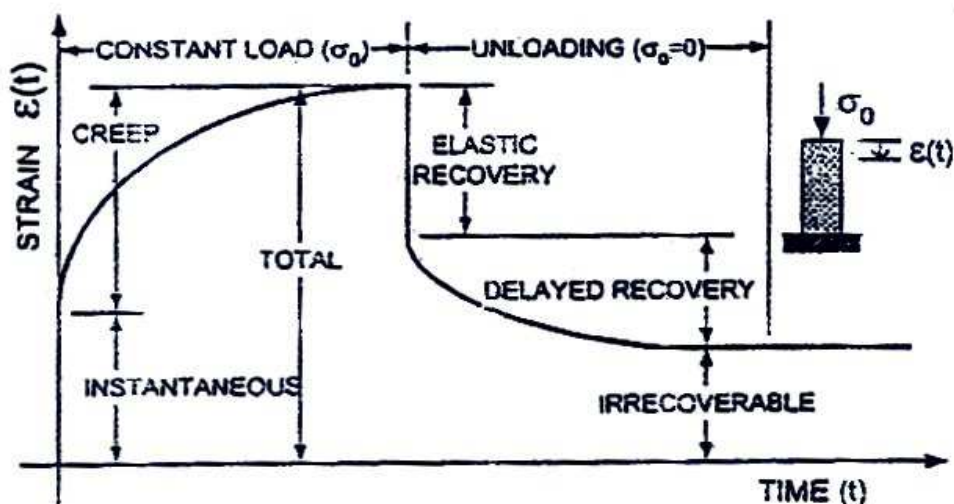


Figura 42. Schema del comportamento deformativo di un campione di calcestruzzo soggetto al rilascio di sforzi [9]

In questo schema monodimensionale appaiono con tutta evidenza le varie fasi di deformazione associabili al comportamento puramente elastico (chiusura a breve termine) e a quello viscoso (chiusura a lungo termine).

Per quanto riguarda le deformazioni a lungo termine, una parte è recuperabile, quella dovuta prevalentemente a fenomeni quali il rilassamento ed il rilascio di sforzi concentrati, per effetto di zone con diversa rigidità nel materiale, ed una

parte è irrecuperabile, quella dovuta al creep, per effetto dello scorrimento viscoso della pasta di cemento e dell'interfaccia pasta di cemento / aggregati. Inoltre la presenza di microfessurazioni dovute a fenomeni di ritiro e di concentrazioni di sforzi durante il carico, producono piccole deformazioni plastiche, irrecuperabili in fase di rimozione dei carichi.

Dati di letteratura [9], basati su prove condotte su carote di 20 cm di diametro di calcestruzzi da diga, sollecitate da 3.6 a 10 MPa e successivamente scaricate, forniscono una stima, sia pur indicativa, della distribuzione quantitativa delle varie componenti deformative:

- chiusura istantanea recuperabile $\approx 50\%$
- chiusura a lungo termine recuperabile $\approx 10\%$
- chiusura a lungo termine irrecuperabile (creep + def. plastica) $\approx 40\%$

Quando in una diga, non sottoposta alla reazione AAR ma sollecitata a compressione, viene praticato un taglio, si può quindi manifestare un recupero deformativo e quindi una chiusura del taglio di entità non trascurabile. Successivi cicli di temperatura, variazioni del livello di invaso possono indurre ad aumenti della deformazione da creep.

4.3.1. CHIUSURA DEL TAGLIO A BREVE TERMINE

In un caso ideale di un provino di calcestruzzo omogeneo, la chiusura elastica del taglio può essere stimata con la relazione [9]:

$$\delta_E = (\beta h_c)(\sigma_0/E_0)$$

La chiusura elastica è direttamente proporzionale allo stato di sforzo iniziale σ_0 e alla profondità del taglio h_c , mentre è inversamente proporzionale al modulo elastico E_0 , dove invece β è una costante che dipende dalle condizioni al contorno. Ad esempio, immaginando una condizione di vincolo sotto il provino (Figura 43.) , β è stato stimato in circa 4/3.

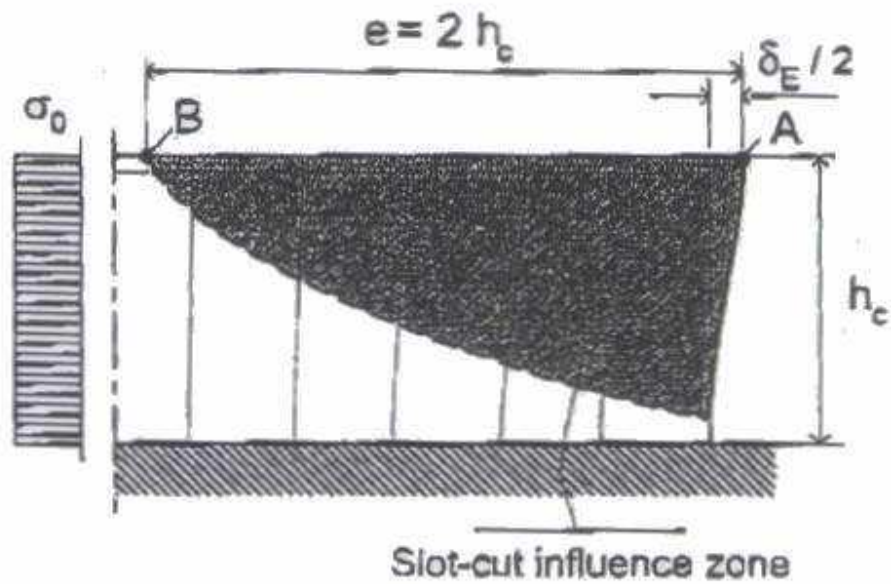


Figura 43. Taglio in un provino di calcestruzzo ideale [9]

L'applicazione di questa relazione ad una diga è spesso molto difficile per via delle disuniformità della geometria e rigidezza nella struttura, oltre ai problemi nella stima di σ_0 e β .

Inoltre, in una diga in cui i tagli vanno ad intercettare fessure o giunti, sono possibili movimenti rigidi di blocchi di calcestruzzo durante il taglio.

4.3.2. CHIUSURA DEL TAGLIO A LUNGO TERMINE

Se un taglio deve rimanere aperto per un tempo t_e la necessaria larghezza può essere così stimata:

$$\delta = [Y_{CR} \delta_{CR}(t_e)] + [Y_T \delta_T^{\max}(t_e)] + [Y_{AAR} \delta_{AAR}(t_e)]$$

dove δ_{CR} è la chiusura differita al tempo t_e per via del creep, δ_{TH}^{max} è la massima chiusura termica e δ_{AAR} è la chiusura da AAR, sempre al tempo t_e .

I γ rappresentano i fattori incrementativi da tenere in conto per via del creep, delle sollecitazioni termiche e degli effetti dell'AAR. La determinazione di questi parametri è però molto difficile in quanto le misurazioni di tipo puntuale sull'opera, le numerose condizioni al contorno fisiche ed ambientali (invaso, temperatura, tenore di umidità, sviluppo del gel espansivo) così come le discontinuità strutturali che il fenomeno può avere indotto (fessure) rendono molto difficile la definizione dei parametri di riferimento e la taratura di un modello di calcolo che sia significativamente rappresentativo dell'effettivo comportamento strutturale.

Per delle stime iniziali i fattori γ , che vanno tarati appunto in base all'esperienza sul campo; possono assumere valori dell'ordine di $2 \div 3$. Lo sviluppo e l'implementazione di adeguati modelli matematici, così come la messa a punto di affidabili prove sperimentali, può contribuire a ridurre sempre più questi fattori di incertezza.

5. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La reazione alcali-aggregato (AAR) nel calcestruzzo è un fenomeno che sempre più frequentemente è associato all'invecchiamento delle dighe in Italia e nel mondo. Il rigonfiamento che ne consegue provoca anomale deformazioni delle strutture, con stati deformativi e tensionali tali da comprometterne la funzionalità e, talvolta, anche la sicurezza.

L'esecuzione di tagli con filo diamantato nelle dighe soggette a tali fenomeni è un'operazione che è stata eseguita in un certo numero di sbarramenti nel mondo e, recentemente (2005 e 2008), anche su dighe Italiane.

Si tratta dell'intervento sicuramente più efficace e compatibile con le esigenze di gestione dei serbatoi. Il suo scopo è essenzialmente quello di ridurre lo stato di sforzo e di deformazione dovuti all'espansione del calcestruzzo da AAR. L'efficienza a lungo termine dell'intervento di taglio dipende dalla profondità dell'apertura praticata con il taglio, che andrà riducendosi con il tempo per il protrarsi del fenomeno espansivo.

Quello che si è potuto constatare nei vari casi esaminati è che, dal punto di vista della risposta strutturale al taglio, a breve e a lungo termine, l'esperienza condotta su di una diga non può essere semplicemente trasposta ad altre.

Per valutare il più correttamente possibile la chiusura di un taglio, è necessario disporre di una buona conoscenza del campo di spostamenti della struttura, di rilievi della temperatura, di accurate misurazioni dello stato di sforzo in situ e la conoscenza dei parametri viscoelastici e di espansione del materiale, attraverso adeguate prove di laboratorio. E' così possibile migliorare gli input di ingresso dei modelli numerici e ridurre al minimo le fonti di incertezza che, comunque, possono essere sempre presenti. Un taglio può, infatti, intercettare fessure o giunti andando a causare movimenti e comportamenti difficili da prevedere.

La modesta corrispondenza che si è sinora riscontrata tra la risposta del prototipo soggetto a rigonfiamento da AAR e sottoposto a tagli e le prime determinazioni

previsionali ricavate dai modelli, nulla toglie ai due aspetti estremamente importanti che l'esperienza di questi ultimi decenni consente di affermare:

- avere ottenuto sempre risultati globali ed “in grande” corrispondenti alle attese ed agli obiettivi;
- avere quindi vinto il “timore reverenziale” ad effettuare interventi così “dissacranti” su strutture ad alto impatto sulla sicurezza e sulla psicologia delle popolazioni.

Il costante monitoraggio delle opere dopo i tagli, e l'analisi accurata di queste misurazioni consentirà, comunque, di valutare in modo ancora più razionale la validità a lungo termine di questi interventi di taglio e di migliorare le capacità di modellazione e previsione del comportamento strutturale delle dighe. E' questo uno degli obiettivi che la ricerca si dovrebbe riproporre per i prossimi anni.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1].Costruzioni Generali Canavesane Sas di Brocco Emilio, "Il Taglio con Filo Diamantato: una Tecnologia Versatile e Rivoluzionaria".
- [2].Marcello, A., "Edison S.p.A. – Diga del Poggia – Taglio dei giunti di Costruzione – Progetto Esecutivo", Ing. Claudio Marcello S.r.l., Gennaio 2005.
- [3].Ditta Ripamonti Dr. Gianni S.a.s., "Diga di Santa Chiara d'Ula – Demolizione Controllata al Diamante – Progetto Tecnico Definitivo – Documentazione Fotografica", Ottobre 2000.
- [4].Spiga, D., "Strumenti e Tecniche non Convenzionali per un Intervento sulla Diga di Corongiu", *Ordine degli Ingegneri della Provincia di Cagliari*, Informazione 103, 2005.
- [5].Sito internet della ditta Tecnic Tecnologie S.r.l. di Monticello d'Alba (CN): www.tecnic.it
- [6].Ripamonti Demolizioni Speciali S.r.l., "Ripristino dell'Integrità della Diga al Lago Eugio – Taglio dei Giunti", 2004
- [7].Marcello, A., "Aem Torino – Ripristino dell'Integrità della Diga al Lago Eugio – Progetto Esecutivo", Ing. Claudio Marcello S.r.l., Settembre 1997.
- [8].ICOLD, "Alkali-Aggregate Reaction in concrete dams – Review and recommendations, Bulletin n° 79, 1991.
- [9].Caron, P., Lèger, P., Tinawi, R., and Veilleux, M., "Slot Cutting of Concrete Dams: Field Observations and Complementary Experimental Studies", *ACI Structural Journal*, V. 100, No. 4, July-August 2003.
- [10]. Sito internet di NW-IALAD – Integrity Assessment of Large Concrete Dams: <http://nw-ialad.uibk.ac.at>
- [11]. Thompson, G.A., Charlwood, R.G., Steele, R.R., Curtis, D. D., "Mactaquac Generating Station Intake and Spillway Remedial Measures". 18th International Congress of Large Dams Q. 68, R. 24, Durban, South Africa.,1994.
- [12]. Hayward, D. G., Thompson, G.A., Charlwood, R.G., Steele, R.R., "Engineering and Construction Options for the Management of Slow/Late Alkali-Aggregate

- Reactive Concrete". 16th International Congress of Large Dams Q. 62, R. 33, San Francisco, USA, 1988.
- [13]. Hayward, D. G., Thompson, G.A., Charlwood, R.G., Steele, R.R., "Remedial Measures at the Mactaquac Generating Station". 17th International Congress of Large Dams Q. 65, R. 47, Vienna, Austria, 1991.
- [14]. Millet, J. C., Renier, D., Goguel, B., Michel, G., "Fissurations de Barrages Provoquées par un Gonflement des Bétons". 15th International Congress of Large Dams Q. 57, R. 35, Lausanne, Suisse, 1985.
- [15]. Goguel, B., de Beauchamp, T., Lefranc, M., Jacquet-Francillon, H., Ho Ta Khanh, M., Michel, G., "Concrete Swelling: Detection, Analysis of Consequences, Remedial Works". 18th International Congress of Large Dams Q. 68, R. 45, Lausanne, Suisse, 1994.
- [16]. Bourdarot Eric, "RAG dans le barrage de Chambon", presentazione al "Colloque sur la réaction alcali-granulats dans les barrages en béton, EPFL, Lausanne (CH), 2006.
- [17]. Abraham, T. J., Sloan, R. C., "Analysis and Repair of Cracking in TVA's Fontana Dam caused by Temperature and Concrete Growth". 13th International Congress of Large Dams Q. 49, R. 1, New Delhi, India. 1979
- [18]. Sito internet della ditta Trentec di Cincinnati (USA): www.trentec.com
- [19]. Charlwood, R.G., Solymar, S.V., and Curtis, D.D., "A review of alkali-aggregate reactions in hydroelectric plants and dams", International Conference of Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, 1-29, Canadian Electricity Association, CEA, and Canadian National Committee on Large Dams, CANCOLD (editors), 1992.

ALLEGATO

ELENCO DELLE DIGHE AFFETTE DA REAZIONE ALCALI-AGGREGATO CASISTICA INTERNAZIONALE DEI SINTOMI E DEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO

Legenda del Tipo di intervento

- A Abbandono
- I Impermeabilizzazione – Drenaggi – Iniezioni
- T Tagli
- R Rinforzi Strutturali
- T/I Tagli + Impermeabilizzazioni – Drenaggi – Iniezioni
- R/I Rinforzi strutturali + Impermeabilizzazioni – Drenaggi – Iniezioni
- V Interventi Vari

DIGHE AFFETTE DA REAZIONI ALCALI - AGGREGATO

CASISTICA INTERNAZIONALE DEI "SINTOMI" E DEGLI INTERVENTI

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Altezza (m)	Sviluppo coronamento (m)	Data costruzione	"Sintomo"	Interventi	Tipo	Periodo
1	Alto Ceira	Portogallo	Arco	37	120	1949	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Abbandono	A	
2	American Falls	USA	Gravità	31,5	176	1958	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Abbandono	A	
3	Arlas	Svizzera	Gravità	15	-	1912	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Abbandono	A	
4	Bloytjern	Norvegia	A speroni	11	-	1950	Fessurazioni verticali diffuse	Iniezione delle fessure ed impermeabilizzazione del paramento	I	
5	Chambon	Francia	Gravità	90	300	1934	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Iniziale iniezione delle fessure ed impermeabilizzazione del paramento, successivi tagli nella diga con filo diamantato e ripristino dell'impermeabilizzazione del paramento	T / I	1995-1997
6	Chickamauga	USA	-	-	-	1940	-	Esecuzione di tagli nella struttura con filo diamantato	T	1965-1970
7	Churchill	Sud Africa	Speroni e voltine	39	-	1943	Fessurazioni orizzontali diffuse	Ingrossamento degli speroni con calcestruzzo armato	R	
8	Chute-à-Caron	Canada	Gravità	1930	-	-	-	Esecuzione di un taglio nella struttura con filo diamantato	T	1997
9	Conniston	Canada	Gravità	14	-	1935	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Sostituzione superficiale del calcestruzzo	V	
10	Corfino	Italia	Arco gravità	38,5	65	1913	Fessure passanti	Iniezione delle fessure	I	

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Altezza	Sviluppo coronamento	Data costruzione	"Sintomo"	Interventi	Tipo	Periodo
11	Dale	Norvegia	Gravità	-	-	1952	Fessurazione diffusa, blocco paratoia	Iniezione delle fessure, taglio dei giunti di costruzione ed impermeabilizzazione del paramento	T / I	
12	Dinas*	Galles	Arco	23	63,4	1957	Grossa fessura longitudinale	Ancoraggio della parte sopra la fessura a quella sotto, iniezione della fessura e taglio del giunto tra la parte ad arco e quella a gravità.	V	fine anni ottanta
13	Fontana	USA	Gravità	146	-	1946	Fessurazione diffusa	Iniezione delle fessure ed esecuzione del taglio di un giunto di costruzione tramite una serie di carotaggi e filo diamantato	T / I	1976, 1983
14	Gmund	Austria	Arco	38	-	1945	Deformazioni anomale e fessurazioni diffuse	Abbassamento della struttura ad arco e collegamento con una nuova struttura a gravità costituita da uno sperone a valle della diga. Successiva iniezione del giunto tra le due strutture	R / I	1993
15	Graus	Spagna	Gravità	27	100	1960	Fessurazione diffusa	Interventi di impermeabilizzazione, trattamento delle fessure e realizzazione di un nuovo sistema di drenaggio	I	
16	High Falls	Canada	Gravità	14	-	1933	Fessurazione diffusa	Riparazioni puntuali di alcune zone della struttura e sostituzione di una pila di uno scarico	V	
17	Hiwassee	USA	-	-	-	1940	-	Esecuzione di quattro tagli nella struttura con filo diamantato	T	1993-1994
18	Kamburu	Kenya	Rockfill	56	-	1974	Deformazioni anomale delle pile dello scarico di superficie	Impermeabilizzazione della struttura con nuovi drenaggi, nuove iniezioni di impermeabilizzazione e messa in opera di ancoraggi alla roccia sottostante per recuperare le deformazioni	R / I	

* In realtà, per la diga di Dinas non è molto chiaro che tipo di taglio sia stato eseguito tra la parte di diga a gravità e la restante ad arco, dal momento che non è stato possibile reperire schemi grafici della diga.

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Altezza	Sviluppo coronamento	Data costruzione	"Sintomo"	Interventi	Tipo	Periodo
19	Keerom	Sud Africa	Arco	38	102,6	1954	Fessurazione diagonale e apertura di alcuni giunti	Iniezioni cementizie delle parti che si erano aperte dei giunti di costruzione e delle fessure	I	
20	La Tuque	USA	Gravità	-	-	1940		Esecuzione di un taglio nella struttura con filo diamantato	T	1993
21	Mactaquac	Canada	Gravità	40	-	1964	Fessurazione diffusa, blocco delle paratoie e apertura di giunti	Esecuzione di tagli del calcestruzzo con filo diamantato	T	1988-1995
22	Owen Falls	Uganda	Gravità	30	-	1954	Fessurazione diffusa	Applicazione di barre pretesate (prima dell'identificazione del AAR)	R	
23	Paugam	Canada	Gravità	24	-	1928	Fessurazione diffusa	Esecuzione di due tagli del calcestruzzo con filo diamantato	T	1991
24	Piedra de Aguila	Argentina	Gravità	170	800	1985	Fessurazione diffusa	Fenomeno insorto durante la costruzione. Applicazione successiva di cemento con pochi alcali, iniezione parziale dei giunti di contrazione e applicazione di barre di armatura in prossimità delle fessure	R / I	
25	Poglia	Italia	Gravità alleggerita	50	137,1	1951	Anomale deformazioni e fessurazione diffusa	Taglio dei giunti di costruzione con filo diamantato	T	2005
26	Poortjieskloof	Sud Africa	Arco	38	144,4	1955	Fessurazione diffusa e derive	Iniezione dei giunti di contrazione	I	
27	Portodemorous	Spagna	Gravità	20	-	1967	Fessurazione diffusa e derive	Iniezione delle fessure con anche l'impiego di resine e applicazione di barre di armatura. Posa in opera all'interno dei giunti aperti di materiale deformabile	R / I	1994
28	Rapides Farmers	Canada	-	-	-	1927	-	Esecuzione di due tagli nella struttura con filo diamantato	T	1993-1995

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Altezza	Sviluppo coronamento	Data costruzione	"Sintomo"	Interventi	Tipo	Periodo
29	RH Saunders	Canada	Gravità	49	-	1947	Espansione del calcestruzzo con conseguenti derive	Esecuzione di tagli del calcestruzzo con filo diamantato	T	1993-1995
30	Rossvass	Norvegia	Gravità	15	300	1957	Fessurazione	Realizzazione di nuovi muri di contenimento in prossimità della diga, messa in opera di nuove paratoie e rifacimento dello scarico di superficie	R	
31	Salas	Spagna	Gravità e speroni	50	240	1973	Fessurazione	Interventi atti ad evitare la circolazione dell'acqua all'interno del calcestruzzo: iniezione con resine delle fessure, sigillatura dei giunti, impermeabilizzazione delle zone fessurate	I	
32	San Esteban	Spagna	Arco gravità	115	295	1955	Deriva della struttura con conseguente danneggiamento dell'impermeabilizzazione con perdite	Iniezione dei giunti ed impermeabilizzazione della parte alta della struttura per rallentare il fenomeno espansivo	I	1987
33	Scala	Svizzera	Arco	26	190	1910	Fessurazione diffusa	Il calcestruzzo ciclopico presente lungo il paramento di valle è stato ancorato al corpo centrale della struttura, impermeabilizzazione del paramento di monte e realizzazione di un nuovo cunicolo di ispezione	R / I	
34	Skarsfoss	Norvegia	Ambursen	30	150	-	Fessurazione diffusa	Impermeabilizzazione del paramento di monte e dei giunti con prodotti epossidici. Impermeabilizzazione del coronamento ed implementazione dell'impianto di ventilazione per ridurre l'umidità nella struttura	I	1988-1989

N°	Nome diga	Ubicazione	Tipo diga	Altezza	Sviluppo coronamento	Data costruzione	"Sintomo"	Interventi	Tipo	Periodo
35	Song Loulou	Cameroon	Gravità, speroni e rockfill	-	-	1976	Fessurazione diffusa	Esecuzione di nuovi fori di drenaggio	I	1991
36	Stewart Mountain	USA	Arco	65	178	1928	-	Nuovo sistema di drenaggio	I	
37	Stolsvatn	Norvegia	Archi multipli	18	740	1970	Fessurazione diffusa	Impermeabilizzazione del calcestruzzo ed applicazione di ancoraggi	R / I	
38	Stompdrift	Sud Africa	Archi multipli	49	-	1965	Fessurazione diffusa	Iniezione dei giunti di costruzione	I	
39	Tabescan	Spagna	Gravità	30	56,6	1960	-	Interventi atti ad evitare la circolazione dell'acqua all'interno del calcestruzzo: impermeabilizzazione del calcestruzzo, impermeabilizzazione dei giunti, trattamento delle fessure ed esecuzione di un nuovo sistema di drenaggio del corpo diga	I	
40	Tislei	Norvegia		15	-	1952	Fessurazione diffusa e blocco paratoie	Impermeabilizzazione con prodotti epossidici, interventi di iniezione e taglio dei giunti di espansione	T / I	
41	Toran	Spagna	Gravità	36	96	1960	-	Interventi atti ad evitare la circolazione dell'acqua all'interno del calcestruzzo: impermeabilizzazione del calcestruzzo, impermeabilizzazione dei giunti, trattamento delle fessure ed esecuzione di un nuovo sistema di drenaggio del corpo diga	I	
42	Warsak	Pakistan	Gravità	22	-	1960	Fessurazione diffusa e derive	Interventi di iniezione, rinforzo della struttura e sostituzione del calcestruzzo danneggiato	R / I	1990