

Masonry Dams in Italy: example of sealing restoration with full reservoir

Dighe italiane in muratura: esempio di ripristino mediante iniezioni a serbatoio pieno

U. Ravaglioli

Dipartimento Idraulica, Trasporti e Strade, Università degli Studi di Roma La Sapienza a.r., Rome, Italy

ABSTRACT: The paper reports about the main features of the masonry Italian dams, built of stones and mortar (conglomerate). This type of dam was widely used in the past, in the first half of the XX century, and about 60 dams of this type are currently still in operation in Italy. They represent a still important infrastructural asset, affected by peculiar ageing process and requiring careful maintenance activities. The case history described in the paper is the sealing restoration by a cement grout curtain, near the upstream face, with injection holes drilled from the crest. The type of intervention has avoided the emptying of the reservoir, weighty aspect for potable water supply. / L'articolo riferisce in merito alle principali caratteristiche delle dighe italiane costruite in pietra e malta (conglomerato). Questa tipologia di diga è stata ampiamente utilizzata in passato, nella prima metà del XX secolo, e circa 60 dighe di questo tipo sono attualmente ancora in esercizio in Italia. Esse rappresentano una ancora importante risorsa infrastrutturale, ancorché influenzata da un peculiare processo di invecchiamento che richiede un'attività di attenta manutenzione. La case history descritta nella memoria riguarda il ripristino dello schermo di tenuta con iniezioni di cemento realizzate, in prossimità del paramento di monte, con fori di iniezione praticati dal coronamento della diga. Il tipo di intervento ha evitato lo svuotamento del serbatoio, aspetto importante per un'opera destinata alla fornitura di acqua potabile.

KEYWORDS: masonry dams, sealing restoration, grout curtain / dighe di muratura, ripristino della tenuta, schermo di iniezioni

1 INTRODUZIONE

Le dighe di “pietra e malta” sono quelle realizzate con elementi lapidei di pezzatura decimetrica di qualunque natura legati con un conglomerato. Sul numero di dighe di questo tipo esistenti attualmente non si hanno notizie precise perché anche il Registro mondiale non le elenca separatamente da quelle di calcestruzzo.

Una valutazione approssimata stimava in 900 quelle esistenti nel mondo (esclusa la Cina) alla fine del 1975; le nuove costruzioni, in esaurimento, dal 1975 ad oggi, delle quali si ha notizia, possono essere stimate in poche decine; in Italia erano 61 alla fine del secolo scorso ed a queste si fa riferimento nella tabella che segue, anche se nel frattempo alcune di esse sono state poste fuori servizio.

Malgrado la vetustà esse rappresentano un patrimonio che ovunque si cerca di salvaguardare; l'argomento è all'attenzione della comunità scientifica da molti anni trattato prevalentemente nel tema dell'“invecchiamento” delle dighe in generale.

Table: Masonry Italian Dams / Le dighe italiane di pietra e malta

| Completion date | number | % |
|------------------------------|--------|-----|
| ≤1920 | 12* | 20 |
| 1921 – 1930 | 29 | 47 |
| 1931 – 1940 | 12 | 20 |
| >1940 | 8 | 13 |
| Total | 61 | 100 |
| Dam height (m) | | |
| 15-20 | 13 | 21 |
| 20,1-30 | 19 | 31 |
| 30,1-40 | 11 | 18 |
| 40,1-50 | 10 | 17 |
| 50,1-60 | 4 | 7 |
| 60,1-70 | 2 | 3 |
| >70 | 2 | 3 |
| Total | 61 | 100 |
| Dam Volume (m ³) | | |
| <10.000 | 17 | 28 |
| 10.001-50.000 | 27 | 45 |
| 50.001-100.000 | 10 | 16 |
| 100.001-200.000 | 5 | 8 |
| >200.000 | 2 | 3 |
| Total | 61 | 100 |

* 4 before 1900

Queste dighe hanno la classica sezione della diga a gravità ordinarie (triangolare con coronamento sommitale; v. Fig. 1) e sono caratterizzate da un corpo diga realizzato con scapoli di pietra e conglomerato con legante di calce e/o di cemento.

All'estero nelle dighe più antiche si tendeva a rendere impermeabile lo stesso corpo della diga; l'orientamento successivo fu di affidare la tenuta ad un manto sul paramento di monte e ciò per motivi sia economici (minore cura nella costruzione del corpo della diga) sia pratici (maggiore facilità negli interventi di ripristino della tenuta); a questo tipo appartengono tutte le dighe italiane;

- un manto sul paramento di monte prevalentemente realizzato con un intonaco di cemento, armato con rete metallica e ancorato al corpo della diga oppure con uno strato di bolognini accuratamente listati a volte supportato a tergo da uno strato di calcestruzzo; esempi rari sono un muro di calcestruzzo o un manto di acciaio;
- un sistema drenante, costituito da canne drenanti in prossimità del paramento di monte, è presente nei due terzi delle dighe, quelle di costruzione più recente;
- giunti di contrazione permanenti sono stati realizzati solo in un terzo delle dighe, anche queste di costruzione più recente;
- una pianta spesso arcuata, nelle dighe più vecchie, con raggi più o meno ampi; a tale curvatura erano attribuite finalità diverse: estetiche, statiche o di tenuta (si riteneva che la pressione dell'acqua potesse serrare eventuali lesioni).

E' interessante l'evoluzione della tipologia di queste dighe in relazione con la curvatura dell'asse planimetrico e con l'adozione di due dispositivi fondamentali delle dighe a gravità: i giunti di contrazione ed il sistema drenante del corpo della diga. La combinazione di questi tre elementi ha caratterizzato concezioni diverse della struttura e la loro evoluzione seguendo i progressi tecnici e scientifici.

Pur con lunghe sovrapposizioni temporali si distinguono chiaramente tre periodi. In un primo periodo (anno "baricentrico" delle costruzioni 1914) le dighe sono caratterizzate dall'assenza sia dei giunti che del sistema drenante e dalla presenza di una curvatura planimetrica; pur verificando le strutture a gravità semplice sembra evidente l'intenzione di sfruttare l'incremento di stabilità assicurato dalla curvatura planimetrica.

Dalla constatazione dei gravi difetti di tenuta denunciati dalle vistose perdite affioranti sul paramento di valle di numerose dighe, è nata

l'esigenza di limitare il flusso che attraversa il corpo della diga per contenere il dilavamento del conglomerato. Quindi in un secondo periodo (anno "baricentrico" delle costruzioni 1930) si è diffusa la pratica di dotare le dighe di un sistema drenante costituito da canne verticali nel corpo della diga; le dighe sono ancora prive di giunti e solo due sono ad asse rettilineo.

Al fine di limitare le fessurazioni di origine termica nelle dighe a gravità sono introdotti i giunti di contrazione; al terzo periodo (anno baricentrico delle costruzioni 1938) appartengono le dighe dotate sia di giunti di contrazione che di sistema drenante.

Indagini condotte su una ventina di dighe hanno evidenziato che la muratura è del tipo "alla rinfusa" con percentuali di pietrame e conglomerato comprese prevalentemente tra il 40 e il 60%, da attribuire a una o all'altra delle due componenti.

I leganti dei conglomerati sono costituiti da calce idraulica (nelle strutture più vecchie), da cemento Portland oppure da una miscela dei due; a volte a questi sono aggiunte sostanze a comportamento pozzolanico (in genere pozzolane naturali); la dimensione massima dell'inerte è sempre dell'ordine di qualche centimetro.

Le condizioni attuali di queste strutture mostrano in molti casi gli effetti dell'invecchiamento conseguenti al tempo trascorso dalla loro costruzione. Per invecchiamento si intende il degrado dei materiali costituenti la struttura e le sue fondazioni, spesso sostenuto dalle modalità di progettazione e costruzione quali cause originarie.

Le carenze progettuali che hanno favorito il degrado della muratura sono l'assenza dei drenaggi, che fa mancare la funzione di intercettazione delle perdite del manto, e dei giunti di contrazione che limitano la fessurazione di origine termica. Quelle esecutive riguardano sia il conglomerato: legante scadente, granulometria degli inerti male assortita, eccessiva quantità dell'acqua di impasto; sia la posa in opera: incompleto riempimento dei vuoti, scarsa costipazione. La conseguenza è un'elevata permeabilità della muratura dalla quale è favorito il fenomeno del dilavamento che rappresenta il più diffuso processo di degrado della muratura.

Determinante poi è la causa diretta rappresentata dalla perdita di tenuta del manto. L'acqua del serbatoio si diffonde nel corpo della diga attraverso i "grandi vuoti" rappresentati da discontinuità in genere al contatto tra il conglomerato e il pietrame o la roccia di fondazione, mentre irrilevante, ai fini della portata delle perdite, è il contributo della porosità del conglomerato che resta rilevante per la progressione del dilavamento all'interno del conglomerato stesso.

Relativamente al degrado dei manti, l'elevato gradiente termico corticale generato dalle variazioni giornaliere di temperatura (a volte aggravato da esposizione sfavorevole) è alla base dell'ammaloramento e dei distacchi dell'intonaco dalla superficie del corpo della diga; sulla disconnessione dei paramenti di bognini ha grande influenza la diversità dei coefficienti di dilatazione tra pietrame e malta che genera micro fessurazioni in quest'ultima; a questo si sovrappongono le variazioni di livello del serbatoio con periodiche saturazioni delle fessure combinate con l'azione del gelo.

Il processo di degrado delle canne drenanti è rappresentato dalla progressiva perdita della loro funzione per ostruzione dovuta a depositi, prevalentemente calcarei, lasciati dall'acqua raccolta.

2 L'INTERVENTO

Argomento dell'intervento illustrato è il ripristino della tenuta di una diga di muratura alta 40 m (v. Figura 1), la cui costruzione, iniziata nel 1947, fu ultimata nel 1952; la funzione di tenuta, affidata ad un manto di bognini, era stata già compromessa da una esecuzione difettosa, come si desume dalle perdite elevate sin dai primi invasi, segnalate dalle portate misurate alle canne drenanti.

L'esigenza di non interrompere l'esercizio del serbatoio (a motivo della sua funzione potabile) limitava il campo delle soluzioni praticabili; esclusa l'applicazione di manti con tecnologie subacquee sia per l'incertezza dei risultati che per l'incognita dei tempi e dei costi, restava un unico tipo di intervento per la riduzione delle perdite: la realizzazione di uno schermo di iniezioni a tergo del paramento di monte.

Trattasi di uno dei più vecchi provvedimenti frequentemente adottato nel passato nelle dighe in muratura; ma l'impiego di miscele molto fluide (necessarie per ottenere una sufficiente penetrazione utilizzando cementi di granulometria standard e con pressioni limitate per evitare danni al paramento), ed una riduzione solo parziale delle perdite, sono stati le cause del ripetersi di clamorosi insuccessi: a distanza di poco tempo (a volte un anno o due, a volte anche meno) le perdite aumentavano di nuovo sempre più rapidamente. In alcuni casi non si è neanche potuto raggiungere il risultato prefissato, in altri la permeabilità residua e l'impiego di materiali inadatti ha portato ad un rapido dilavamento della miscela iniettata e quindi alla necessità di interventi successivi a breve scadenza.

Inoltre questa successione di iniezioni ha provocato in molte dighe l'ostruzione parziale o

totale delle canne drenanti inducendo l'illusoria convinzione di una riduzione delle perdite presto smentita dall'incremento degli affioramenti sul paramento di valle.

In tempi recenti, peraltro, il progresso della tecnica delle iniezioni e l'impiego di microcementi, di superfluidificanti e di sostanze chimiche, che aumentano le possibilità di successo, hanno indotto a verificare l'efficacia di un nuovo intervento razionalizzando le procedure.

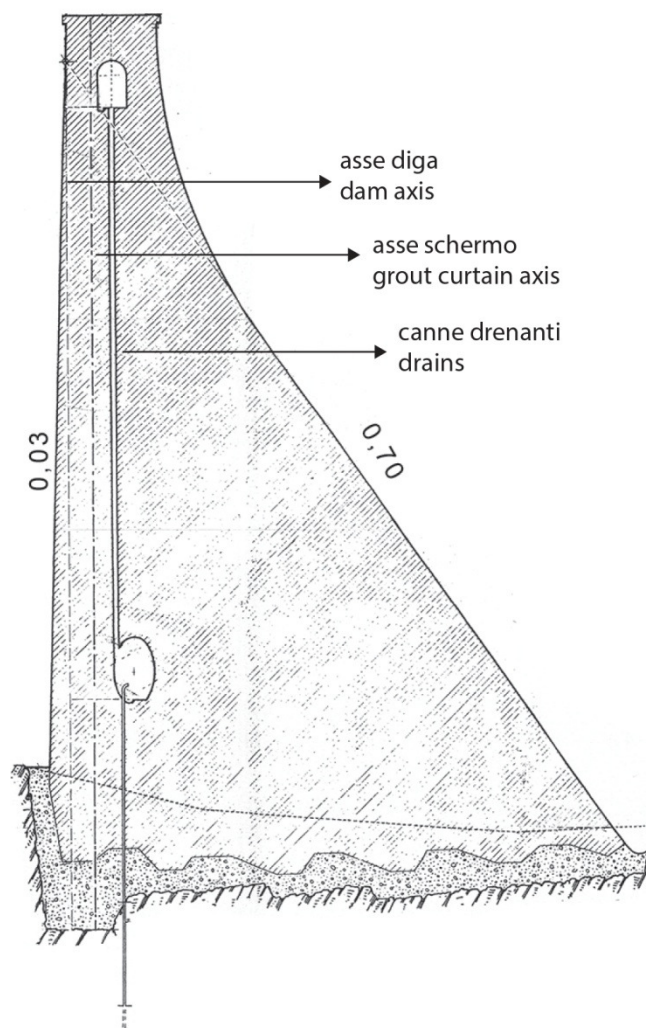


Figure 1. Dam section / Sezione della diga

È necessario anzitutto tenere conto che trattasi di un'operazione assai delicata per una serie di aspetti che è indispensabile avere ben presenti:

- la necessità di eseguire le iniezioni tra il piano delle canne drenanti discendenti ed il paramento di monte e di salvaguardare l'integrità di quest'ultimo, non consente la realizzazione di uno schermo su più file;
- uno schermo unifilare ammette scarsissima tolleranza sulla direzione delle perforazioni;
- è indispensabile raggiungere una bassissima permeabilità per evitare il rapido degrado dello schermo in conseguenza di una ricca circolazione

di acqua anche in considerazione delle forti cadenti piezometriche conseguenti al limitato spessore dello schermo stesso;

- particolare attenzione è da porre nella determinazione delle pressioni di iniezione per evitare da un lato una scarsa diffusione della miscela e dall'altro danni alla struttura;
- alla stessa problematica è legata la scelta delle miscele da iniettare. Un elevato rapporto A/C ne favorisce la diffusione ma ne riduce fortemente la resistenza al dilavamento; ai bassi rapporti A/C i pori sono separati dal gel del cemento e il sistema capillare discontinuo ostacola la permeabilità; appena superato il rapporto stechiometrico il sistema inizia ad acquisire continuità e la permeabilità cresce sempre più rapidamente al crescere del rapporto A/C;
- una miscela “grossolana” (cemento 325, filler, sabbia) ha scarsa diffusione, richiede pressioni più elevate e non ha influenza sulla porosità più minuta. Una miscela “sottile” (cementi microfini, sostanze chimiche) ha ottima penetrazione ma con grande frequenza può risultare impossibile “andare in pressione” con conseguente inaccettabile dispersione di grandi quantità di materiali pregiati nei “grandi vuoti” della struttura;
- le canne drenanti discendenti possono essere ostruite dalla miscela di iniezione.

3 IL PROGETTO E LA SPERIMENTAZIONE

Sia per verificare, nel caso specifico, la possibilità di raggiungere un risultato soddisfacente, sia per acquisire informazioni sui materiali da impiegare e sulle modalità esecutive, si è ritenuta necessaria una fase di sperimentazione da condurre direttamente su un concio della diga, suddividendolo in tre campi prova (pannelli) da trattare in modi diversi.

Dalle indagini condotte sulla muratura è risultato che questa era composta dal 40% di conglomerato di cemento e dal 60% di pietrame granitico di pezzatura fino a 40 cm; il conglomerato è poco compatto ma con una porosità minuta intorno al μm e quindi non iniettabile e praticamente impermeabile. I vuoti che interessano la permeazione sono allora quelli rimasti tra pietrame e conglomerato nonché le fessure e cavità millimetriche e centimetriche del conglomerato stesso; tutti questi vuoti sono stati valutati pari al 6% del volume della muratura.

Fu pertanto ritenuto essenziale la preliminare iniezione di miscele di basso costo sia per riempire i vuoti di maggiori dimensioni sia per intasare vie di dispersione per la miscela di maggior pregio.

Fu invece rimandata ad una seconda fase la sperimentazione con miscele chimiche tra le quali erano state scelte delle resine idroespansive di documentata atossicità che consentono di ottenere diversi tempi di gelificazione con una semplice operazione di dosaggio dei suoi componenti.

Furono prefissati:

- la posizione del piano verticale dei fori tra il paramento di monte ed il piano delle canne drenanti;
- le modalità di perforazione per superare le particolari difficoltà a mantenere la direzione dovute alla grande differenza di caratteristiche meccaniche tra malta e pietrame granitico che costituiscono la muratura della diga: grande lunghezza (almeno 3,00 m) e grande diametro (100 mm) del carotiere, aste pesanti e perfettamente rettilinee, stabilità del piano di lavoro, controllo della verticalità ogni 10,00 m di perforazione (controlli più sofisticati della verticalità furono esclusi per i costi elevati);
- il rigoroso controllo delle pressioni massime di iniezione; esse furono determinate sulla base di un'analisi teorica applicando ampi margini di sicurezza a fronte dei numerosi fattori non noti o comunque valutabili con grande approssimazione: raggio di diffusione della miscela, distribuzione della pressione radialmente al foro, resistenza a trazione e taglio della muratura etc.; ne sono risultate pressioni crescenti con la profondità dal coronamento per l'aumento della distanza del piano dei fori dal paramento a motivo della inclinazione di questo;
- la ricerca e la posa in opera di una sabbia di composizione granulometrica tale da non impedire il drenaggio dell'acqua ma che risultasse praticamente impermeabile alle miscele, da impiegare per riempire le canne drenanti al fine di prevenirne l'ostruzione. Per evitare comunque di interessare tutte le canne del concio, dovevano essere riempite solo quelle del pannello in sperimentazione; al termine dovevano essere vuotate e riperforate o semplicemente alesate a seconda dell'efficacia del provvedimento, prima di passare al successivo campo prove.

Le prove sulle miscele di cemento furono condotte facendo variare i rapporti tra i diversi componenti (cementi 32,5 e microfine, bentonite, superfluidificante, sabbia e acqua) e si conclusero con la messa a punto di tre miscele: la miscela B la più densa con cemento 32,5 e sabbia; la miscela C3 come la B senza sabbia; la miscela M1 con cemento

microfine.

Furono previsti 16 fori dal coronamento alla fondazione con procedure di perforazione, di iniezione e di controllo solo indicative da mettere a punto sulla base dei risultati via via ottenuti.

4 I RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE E I LAVORI

Visti gli ottimi risultati, ottenuti nella sperimentazione, con i micro-cementi, fu definitivamente abbandonata l'idea di impiegare le resine, relativamente alle quali permaneva qualche perplessità sulla delicatezza della lavorazione e sulla tossicità dei componenti incidentalmente non combinati.

I risultati delle sperimentazioni consentirono di definire la successione ottimale delle operazioni da adottare nei lavori:

- primari ad interasse di 2,00 m iniettati con miscela C3; se necessario (per assorbimenti eccessivi) con miscela B;
- secondari ad interasse 2,00 m iniettati con miscela M1; se necessario, con miscela C3;
- terziari ad interasse 1,00 m iniettati con miscela M1.

Le pressioni di iniezione, crescenti con la profondità, furono quelle determinate teoricamente e verificate nella fase sperimentale.

L'iniezione dei primari e dei secondari fu eseguita per tratte di 2,50 m in down-stage con riperforazione della tratta iniettata dopo almeno 12 ore di stagionatura; l'iniezione dei terziari fu eseguita in up-stage per tratte di 5,00 m; in alcuni pannelli, tenuto conto che le perdite misurate alle canne drenanti, dopo l'iniezione dei primari e dei secondari, si erano completamente annullate, è stata sospesa l'esecuzione sistematica dei terziari, limitandola ad alcuni di essi con funzione di controllo e di eventuale integrazione.

Sono state eseguite perforazioni per circa 2800 m con un assorbimento medio generale di 36,00 kg/m di cemento così distribuiti:

- primari: 56,60 kg/m di cemento 32,5
- secondari: 22,60 kg/m di cemento microfine
- terziari: 8,00 kg/m di cemento microfine

Ultimate le iniezioni di ogni pannello, veniva caricata la sabbia di riempimento delle canne drenanti prima di vuotarle, per verificare le eventuali intrusioni di boiaccia che sono risultate pochissime e totalmente isolate.

La sperimentazione aveva già dimostrato la

possibilità di raggiungere una tenuta pressoché totale poiché le perdite dalle canne drenanti antistanti la zona trattata erano state completamente annullate; a distanza di otto anni dal termine dei lavori è possibile confermare questo risultato per tutta la diga. Anche l'accorgimento di riempire la canne drenanti di sabbia opportunamente calibrata è risultato efficace al fini di impedirne l'ostruzione per cui fu sufficiente un semplice alesaggio invece della riperforazione.

5 CONCLUSIONI

With the use of micro-cements and water reducing admixture together with careful experimentation to define the mixtures, the succession of holes and grouting techniques, it is possible to obtain a grout curtain almost impervious behind the upstream face; this characteristic is the main guarantee about the duration of the remedial measures and therefore against the curtain itself and masonry leaching.

Con l'uso di micro-cementi e di additivi fluidificanti e con una accurata sperimentazione per definire le miscele, la successione dei fori e le tecniche di iniezione, è possibile ottenere uno schermo, dietro il paramento di monte, quasi totalmente impermeabile; questa caratteristica costituisce la migliore garanzia della durata degli interventi adottati e quindi contro il dilavamento dello stesso schermo e della muratura.

REFERENCES

- Gouvenot, D., Bouyge, B., Francq, J., Jensen, A. 1991. Perte d'étanchéité par vieillissement du corps des barrages- pratiques en développement d'actions correctives. *ICOLD: Dix-septième Congrès, Q.65, R.40.*
- ICOLD Congresses: 1968, Q.34; 1979, Q.49; 1985, Q.59; 1991, Q.65; 1994, Q.68; 1997, Q.75; 2009, Q.90; 2012, Q.95.
- Lino, M., Salembier, M., Antoine, F., Rouas, G., Clerdouet, D., Saint-Marcel, A., 1991. Vieillesse de quelques barrages français très anciens pratique de leur rehabilitation. *ICOLD: Dix-septième Congrès, Q.65, R.1.*
- Person, E. 1998. Pontabouland dam- Strengthening with active anchors. 1998. *Dams Safety, Berga (ed), Balkema, Rotterdam.*
- Rathod, K., Jani, A. & Jajal, M. 1998. Control and evaluation of aging for masonry gravity dams. *Dam Safety, Berga (ed), Balkema, Rotterdam.*
- Ravaglioli, U. 2013. Masonry Dams in Italy. *9th ICOLD European club Symposium, Venice, April 10-12.*