

# LE DIGHE DI PIETrame E CONGLOMERATO IN ITALIA

Ugo Ravaglioli<sup>1</sup>

## 1 – INTRODUZIONE

Si intendono come dighe di muratura di pietrame e conglomerato<sup>2</sup> (d'ora in poi indicate come dighe di muratura) quelle realizzate con elementi lapidei di pezzatura decimetrica di qualunque natura legati con un conglomerato.

Sul numero di dighe di muratura 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 concentrate in Spagna (Canarie) e India; 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.

Data ultimazione lavori		%
≤1920	12 di cui 4 nel 1800	20
1921 – 1930	29	47
1931 – 1940	12	20
>1940	8	13
	<b>61</b>	<b>100</b>
Quota coronamento (m s.m.)		%
0-500	16	26
501-1.000	15	24
1.001-1.500	5	8
1.501-2.000	12	20
2.001-2.500	12	20
>2.500	1	2
	<b>61</b>	<b>100</b>

<sup>1</sup> Professore già nell'Università di Roma "La Sapienza"

<sup>2</sup> La dizione corrente è "pietrame e malta". Ma dalle indagini, ormai numerosissime, condotte sulle dighe italiane, è accertato che gli inerti della "malta" hanno sempre  $D_{max}$  di qualche centimetro. Si ritiene quindi più corretto adottare la dizione onnicomprensiva di "pietrame e conglomerato".

<b>Altezza diga (m)</b>		<b>%</b>
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
	<b>61</b>	<b>100</b>
<b>Volume diga (m<sup>3</sup>)</b>		<b>%</b>
<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
	<b>61</b>	<b>100</b>
<b>Con platea di calcestruzzo</b>	35 su 58	60
<b>Con giunti permanenti</b>	22 su 61	36
<b>Con drenaggio del corpo diga</b>	37 su 59	63

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.

## **2 - LA TIPICA DIGA DI MURATURA**

Fino alla seconda metà del secolo diciannovesimo le dighe di muratura erano concepite con sezione prossimamente rettangolare a volte rinforzata da rilevati o da speroni; alcune di queste opere sono ancora in esercizio altre invece sono fuori servizio o in servizio limitato; il numero è molto ridotto e l'interesse nei loro riguardi è principalmente di natura storica.

Le strutture più recenti, realizzate cioè dopo la fine del diciannovesimo secolo, sono progettate con profilo fondamentale triangolare, sempre verificate a gravità ma molte di esse, per la pianta arcuata e per l'assenza di giunti, hanno comportamento statico ad arco gravità. Nella loro struttura originaria possono essere così caratterizzate:

- corpo della diga realizzato con scapoli di pietra e conglomerato con legante di calce o di cemento con o senza ricorsi orizzontali regolari. Nelle dighe più antiche si tendeva a rendere impermeabile lo stesso corpo 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 sottotipo appartengono tutte le dighe italiane;
- fondazione con appoggio diretto della muratura sulla roccia oppure con interposizione di una platea di calcestruzzo;
- paramento di monte realizzato con un manto Levy oppure con uno strato di bolognini accuratamente listati, oppure ancora con uno strato di intonaco; esempi rari in Italia il manto o il muro di calcestruzzo; unico il manto di acciaio;
- paramento di valle spesso costituito anch'esso da uno strato di bolognini oppure di pietre non squadrate e listate a mosaico. A volte è intonacato; raramente sono presenti dei barbacani per drenare la muratura retrostante;
- pianta spesso arcuata con raggi più o meno ampi; a tale curvatura sono attribuite finalità diverse: estetiche, di tenuta (si attribuiva alla pressione dell'acqua il serraggio di eventuali lesioni sub verticali), statiche;
- giunti di contrazione permanenti comparsi solo successivamente sia nelle dighe ad asse rettilineo sia in quelle ad asse curvo. La tenuta è assicurata da nastri di gomma o lamierini fissati sul paramento con profilati metallici oppure da lamierini affogati nella muratura protetti da materiali bituminosi forzati nei giunti sul paramento; in tempi più recenti, da lamierini o nastri di materiale sintetico e pozzetti di bitume protetti da classiche travi coprigiunto di calcestruzzo armato;
- la sezione trasversale, fondamentale triangolare con espansione di coronamento, è frequentemente piuttosto ristretta; qualche volta i paramenti sono realizzati a pendenza variabile;
- in Italia mancano spesso (o sono inadeguati), con l'eccezione di alcune dighe più recenti, gli schermi di tenuta e, quasi sempre, quelli di drenaggio in fondazione mentre sono numerose le dighe con drenaggi nel corpo diga.

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 fasi progettuali.

In un primo periodo le dighe (n° 20, se si escludono n° 4 traverse; la prima finita di costruire nel 1879 e l'ultima nel 1928; anno baricentrico 1914) 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; inizialmente per contenere il dilavamento della muratura e successivamente, con il consolidamento del concetto di pressioni interstiziali, anche per motivi statici. Quindi in un secondo periodo si è diffusa la pratica di dotare le dighe (n° 15; la prima finita di costruire nel 1922, l'ultima nel 1948; anno baricentrico 1930) di un sistema drenante costituito da canne verticali nel corpo della diga oppure di un manto Levy sul paramento di monte; le dighe sono ancora prive di giunti e solo due sono ad asse rettilineo.

Al terzo periodo, mediamente più recente, appartengono le dighe (n° 22; la prima finita di costruire nel 1926, l'ultima nel 1956; anno baricentrico 1938) dotate sia di giunti di contrazione che di sistema drenante.

## **2.1 – LA MURATURA**

La muratura è costituita da scapoli di pietrame di dimensioni decimetriche legati con un conglomerato con percentuale in volume intorno al 40-60%; percentuale decisamente maggiore, unitamente a più grandi dimensioni sia del pietrame che degli inerti del conglomerato, caratterizzano il "calcestruzzo ciclopico" non trattato in questa sede.

Con riferimento all'impiego nella costruzione delle dighe si possono distinguere quattro diversi tipi di muratura:

- muratura alla rinfusa ("a sacco");
- muratura a ricorsi;
- muratura a faccia vista (a mosaico);
- muratura di pietre squadrate (bolognini).

In Italia la prima è impiegata, senza eccezioni per quanto noto sinora, per la realizzazione del corpo della diga, a volte interrotta da ricorsi a intervalli regolari, e le ultime due per i paramenti.

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 (pozzolane naturali, materiali laterizi macinati); la dimensione massima dell'inerte è sempre dell'ordine di qualche centimetro.

## **2.2 – IL SISTEMA DI TENUTA**

### **2.2.1 – Del paramento**

I tipi di paramento ai quali era affidata originariamente la tenuta sono:

- manto di Levy: costituito da una serie di voltine di cemento armato (raggio generalmente inferiore al metro e spessore 20-30 cm), protette da un intonaco di tenuta, impostate sulla superficie di monte del corpo della diga; si realizza così un'intercapedine che isola il corpo diga dal serbatoio.

1 su 5 assolve ancora la sua funzione.

- bolognini stilati con malta ricca di cemento; spesso a tergo uno spazio decimetrico veniva riempito con malta o conglomerato fluido; la tenuta veniva migliorata da iniezioni di paramento eseguite in fase di costruzione o dopo le prime perdite.

11 su 21 assolvono ancora la loro funzione.

- intonaco ad alto dosaggio di cemento dello spessore di alcuni centimetri spesso armato con una rete metallica, e ancorato con alcuni ferri infissi nel corpo diga.

22 su 31 assolvono ancora la loro funzione.

- manto (spessore 0,20-0,50 m) o muro (0,60-4,00m) di calcestruzzo armato.

3 su 3 assolvono ancora la loro funzione.

- manto di acciaio ARMCO 2,00 mm , caso unico.

Assolve ancora la sua funzione.

Le condizioni ambientali erano prevalenti nella scelta del tipo di paramento; le quote medie delle dighe interessate sono indicative dei criteri seguiti: muri, 492 m s.m.; intonaci, 792 m s.m.; bolognini, 1600 m s.m.; manti di Levy, 1978 m s.m.; manto di acciaio, 2145 m s. m.

### **2.2.2 – Della fondazione**

Nelle condizioni originarie non è quasi mai presente uno schermo di tenuta e laddove è stato fatto, è in genere piuttosto rado, corto e su unica fila e quindi di scarsissima efficacia; inoltre molte segnalazioni di "iniezioni al piede della diga" sono da intendere come una cucitura piuttosto che un vero e proprio schermo.

Sul piano teorico la soluzione è coerente col sistema di drenaggio che si arresta alla superficie del piano di fondazione per cui la funzione delle iniezioni è limitare la permeazione lungo questa, che era assunta quale unica superficie critica di scorrimento.

La scarsa importanza data allo schermo aveva anche altre motivazioni quali una limitata conoscenza delle tecniche di intervento e della loro efficacia e la presenza in genere di rocce di buone caratteristiche che non temono processi di degrado per erosione.

## **2.3 – IL SISTEMA DI DRENAGGIO**

### **2.3.1 – Del corpo della diga**

Il sistema drenante ha la funzione di sottrarre il corpo della diga al flusso di permeazione ed al relativo campo di pressioni interstiziali alimentati dalle perdite del paramento di monte.

Il manto di Levy evita completamente la circolazione delle perdite nel corpo della diga; ma la sua esile struttura non ha dato buoni risultati nelle severe condizioni ambientali delle dighe in alta quota.

La circolazione dell'acqua nelle dighe di muratura avviene attraverso "grandi vuoti" interconnessi non compatibili con la teoria dei dreni fondata sulla legge di Darcy che presuppone una porosità diffusa uniforme. In tali condizioni è possibile che importanti linee di flusso sfuggano al sistema drenante discontinuo costituito dalle canne; non è noto se è per questa preoccupazione che le canne drenanti hanno grandi diametri: minimo 0,20 m ma spesso 0,40- 0,50 e a volte anche 0,60 m.

### **2.3.2 – Delle fondazioni**

Salvo che in alcune delle dighe più recenti, le canne drenanti originarie del corpo diga si arrestano sul piano di contatto con la roccia.

Il sistema è di scarsa efficacia e non consente di limitare le sottopressioni da assumere nelle verifiche allo scorrimento, perché:

- non drena superfici di potenziale scorrimento poste sotto il piano di fondazione;
- anche per il piano di fondazione ha effetto solo se le discontinuità della roccia (sempre associate a superfici preferenziali di flusso) sono complanari con il piano di fondazione.

### **3 – L'INVECCHIAMENTO ED IL DEGRADO**

Data l'età di queste strutture, sulle loro condizioni attuali hanno influito processi di invecchiamento.

Nel Bollettino ICOLD n. 93 l'invecchiamento è definito come il deterioramento delle proprietà dei materiali costituenti la struttura e le sue fondazioni che si verifica con il trascorrere del tempo, a partire da cinque anni dopo la costruzione ed in condizioni normali di esercizio, con esclusione quindi degli effetti di eventi eccezionali.

È necessario estendere il concetto di invecchiamento alle modalità di progettazione e di costruzione non tanto per metterne in evidenza le difformità rispetto alle normative ed ai criteri di sicurezza attuali, difformità che non interessano in questa sede, quanto per individuare le cause originarie dei processi di degrado.

Si precisa che non saranno trattati gli argomenti riguardanti le opere di scarico e la roccia di fondazione.

#### **3.1 – LE CAUSE ORIGINARIE DEL DEGRADO**

##### **3.1.1 – Le carenze progettuali**

Le carenze progettuali più frequenti che possono aver favorito i processi di degrado nel tempo sono:

- la ridotta sezione trasversale per aver trascurato o sottovalutato la spinta del ghiaccio, le pressioni interstiziali, le azioni sismiche, le portate di piena e quindi i livelli massimi nel serbatoio. A tutto ciò conseguono trazioni sul paramento di monte che possono evolvere in fessurazioni;
- l'assenza di drenaggi nel corpo della diga; da ciò ha origine una più ricca circolazione di acqua e l'incremento delle pressioni interstiziali;
- la mancanza di schermi di iniezione e di drenaggio in fondazione. A questo a volte è attribuito (oltre all'aumento delle sottopressioni in fondazione) anche un incremento delle pressioni interstiziali nel corpo della diga alimentate da vie d'acqua nella roccia;
- la mancanza di giunti permanenti, alla quale potrebbero essere imputate fessurazioni verticali del corpo della diga di origine termica;
- la concezione di alcune strutture di tenuta come i manti di Levy.

### **3.1.2 – Le carenze esecutive**

Le carenze esecutive possono essere suddivise in:

- carenze nei materiali:
  - pietrame: salvo qualche modesto caso di esfoliazione, non si hanno notizie su processi di degrado del pietrame; è rilevante invece, per le sue conseguenze, la diversità dei valori del coefficiente di dilatazione tra pietrame e conglomerato;
  - conglomerato: sono frequenti i casi di bassa qualità: legante scadente, granulometria degli inerti male assortita (in particolare carenza di fino nella sabbia), eccessiva quantità d'acqua di impasto; la qualità e gli alti dosaggi del legante spesso impiegati portano allo sviluppo di grandi quantità di calore di idratazione. La calce idraulica è stata a volte preparata sul posto con materiali e lavorazioni scadenti; sia la calce che il cemento Portland sono leganti molto sensibili all'azione dilavante dell'acqua di filtrazione
- carenze nella posa in opera:
  - scarsa cura nei riempimenti, mancanza di costipamento, patine terrose sul pietrame; ne conseguono una ridotta aderenza del conglomerato al pietrame e la formazione o l'ampliamento di "grandi vuoti" anche centimetrici al contatto che sono la sede della circolazione dell'acqua nel corpo della diga.

## **3.2 – LE CAUSE DIRETTE DEL DEGRADO**

### **3.2.1 – Le reazioni chimiche tra i materiali della muratura (AAR, ASR...)**

Prima del 2000 erano scarsissime le segnalazioni su questo argomento riguardanti le dighe di muratura; nel Bollettino ICOLD n. 93 del 1994 non è citato alcun caso in Italia; oggi invece sono documentati diversi casi di questo fenomeno.

L'effetto è un'espansione che può indurre stati tensionali nella struttura per vincoli interni ed esterni e un degrado del conglomerato.

### **3.2.2 – Le reazioni chimiche con l'ambiente**

Tra i vari tipi di aggressione delle acque di permeazione, di gran lunga il più importante e il più diffuso è l'attacco dilavante delle acque pure ad alto contenuto di anidride carbonica aggressiva, che si risolve nell'asportazione di ossido di calcio dal legante di malte e conglomerati.

### **3.2.3 – Le reazioni fisiche con l'ambiente**

- Le variazioni di temperatura; unitamente all'azione delle acque pure, sono la causa più

diffusa di degrado:

- il raffreddamento dopo la costruzione; l'alta percentuale di conglomerato (40÷60%), l'impiego di cemento Portland e gli alti dosaggi (300-400 kg/m<sup>3</sup>) pongono problemi di calore di idratazione analoghi a quelli delle dighe di calcestruzzo, non sempre compensati dalla lentezza della costruzione; li aggravano le grandi dimensioni del pietrame per la diversità dei coefficienti di dilatazione con il conglomerato; ne possono conseguire distacchi al contatto.

L'assenza di giunti di contrazione può provocare lesioni verticali che interessano profondamente la struttura.

- le variazioni stagionali possono prolungare ed ampliare le lesioni nelle dighe prive di giunti e i distacchi al contatto tra pietrame e conglomerato.
  - le variazioni giornaliere sollecitano gli strati corticali soggetti a forti gradienti termici rapidamente variabili; ne consegue il degrado dei paramenti di intonaco e delle stilature dei bolognini.

- Il gelo

L'azione del gelo ha effetti su spessori molto piccoli ma sufficienti a danneggiare gravemente i paramenti; la penetrazione dell'acqua ed il congelamento avviene nei pori della malta degli intonaci o delle stilature dei bolognini, nei distacchi tra malta e pietrame nonché nelle fessure formatesi per qualsiasi causa.

L'efficacia dell'azione del gelo cresce con il grado di saturazione del materiale e con la frequenza dei cicli di gelo e di disgelo.

L'effetto è particolarmente vistoso sul paramento di monte nella fascia di oscillazione dei livelli e nella parte bassa del paramento di valle quando interessata dall'emersione delle perdite dal corpo della diga.

### **3.2.4 I carichi statici: permanenti e ripetuti**

Lo stato tensionale può indurre deformazioni plastiche e viscosi; le forti e frequenti variazioni di carico possono danneggiare il materiale della struttura per due vie: per "collassi incrementali" laddove le tensioni si concentrano, per mancanza, degrado o asportazione di materiale, lungo i perimetri delle cavità, lungo i contatti tra materiali diversi, alle estremità delle fessure, etc.; oppure per degrado delle superfici a contatto delle fessure in conseguenza della ripetizione di movimenti e deformazioni. Non risultano però casi documentati.

## 4 – GLI EFFETTI DEL DEGRADO

### 4.1 – LA MURATURA

Formalmente il degrado presuppone dei termini di riferimento iniziali rispetto ai quali valutarlo; poiché nel caso specifico mancano<sup>(3)</sup> le caratteristiche originarie del conglomerato (peso di volume, resistenze, moduli), questa valutazione non è possibile in linea di principio.

Anche l'assunzione come riferimento della parte più alta delle dighe sottoposta a carichi modestissimi ed in particolare non soggetta a permeazione, non ha risolto il problema: infatti il livello delle caratteristiche meccaniche è risultato spesso inferiore a quello della parte bassa e a volte il conglomerato è realizzato con dosaggi di legante diversi.

D'altra parte è da considerare che la principale fonte di degrado della muratura è il dilavamento e che ormai le forti perdite sono state eliminate dalla gran parte delle dighe, oppure lo saranno in tempi brevi; allora la ricerca del degrado rispetto alle condizioni originarie finisce per perdere la sua utilità previsionale sulle condizioni future della diga.

Considerazioni analoghe valgono per i fenomeni espansivi perché il livello dei processi ed il loro progresso non sembra possano alterare, a breve o a medio termine (a meno di improvvise accelerazioni), le caratteristiche della muratura; i parametri fisico-meccanici dei conglomerati nei quali è stato accertato un fenomeno reattivo espansivo in atto da decenni non sono apparsi diversi dagli altri. Per gli stessi motivi si ritiene che anche le coazioni indotte dall'espansione non possano produrre, salvo qualche vistosa eccezione, danni meccanici apprezzabili a breve termine.

Si è quindi ritenuto sufficiente, per qualsiasi analisi o progetto di intervento, fare riferimento alle condizioni attuali della muratura.

È da aggiungere che in un quadro di scadenti caratteristiche originarie non è facile, salvo casi particolari, valutare in che misura sulle condizioni attuali abbia influito il degrado dovuto all'invecchiamento.

---

<sup>(3)</sup> Non possono essere considerate riferimenti le rare prove in fase di costruzione, delle quali è pervenuta notizia, sia per la mancanza di informazioni sulle modalità operative sia perché eseguite su provini confezionati e non prelevati da carotaggi.

#### **4.1.1 – La riduzione del peso di volume**

E' conseguenza dell'attacco dilavante da parte delle acque pure con l'asportazione di calce libera e deposito di carbonato di calcio all'affioramento; i casi più avanzati di dilavamento sono accompagnati anche da fenomeni erosivi con depositi di sabbia terminali.

Salvo casi eccezionali la riduzione di peso procede assai lentamente.

#### **4.1.2 – Le variazioni di volume**

Le riduzioni di volume permanenti per dissipazione del calore di idratazione si esauriscono in breve tempo dopo la costruzione; le deformazioni plastiche e viscosi invece possono proseguire per lungo tempo dopo la costruzione ma non sono mai state rilevate forse per la mancanza di strumentazione, forse perché molto modeste, forse perché coperte da fenomeni espansivi.

Frequenti sono invece in queste dighe gli aumenti di volume da reazioni espansive nella muratura; oltre alle reazioni alcali-aggregati.

#### **4.1.3 – La riduzione della resistenza e del modulo**

Il modulo e le resistenze a compressione e a trazione sono minati nel tempo dall'azione delle acque pure per asportazione del calcio o da reazioni chimiche con trasformazione dei componenti del legante.

Anche la ripetizione dei carichi può danneggiare il conglomerato riducendo il modulo e la resistenza dell'ammasso.

La resistenza al taglio è critica lungo la superficie di fondazione e sui giunti di ripresa della costruzione dopo interruzioni prolungate. Poiché queste sono sempre superfici preferenziali per la circolazione dell'acqua, lungo esse si avrà la massima perdita di legante con riduzione della componente coesiva della resistenza al taglio e formazione o ampliamento di "grandi vuoti" con esaltazione anche degli effetti dei carichi ripetuti.

#### **4.1.4 – L'aumento della permeabilità**

Il contributo della porosità del conglomerato è quantitativamente irrilevante nella valutazione delle perdite del corpo della diga che sono dovute, quasi esclusivamente, ai "grandi vuoti"; l'ampliamento di questi per dilavamento aumenta con il flusso di permeazione e quindi il fenomeno tende ad esaltarsi.

La porosità del conglomerato ha rilevanza solo per il processo di degrado del conglomerato stesso.

#### **4.1.5 – L'incremento delle pressioni interstiziali e delle sottopressioni**

La perdita di tenuta del paramento di monte è la causa primaria della presenza delle

pressioni interstiziali esaltate nella loro diffusione dalla mancanza o dalla ostruzione del sistema drenante.

Sottopressioni elevate sul piano di fondazione sono conseguenza della mancanza di schermi di tenuta e di drenaggio in fondazione, mancanza che può provocare anche un aumento delle pressioni interstiziali nel corpo diga.

Un contributo all'incremento delle pressioni può anche derivare dalla bassa permeabilità del paramento di valle, spesso realizzato con muratura a mosaico accuratamente listata, in genere privo di barbacani, ma anche dal doppio fenomeno di dilavamento e deposito dei carbonati dell'acqua di filtrazione che genera una migrazione verso valle della zona meno permeabile della diga.

#### **4.1.6 – Le lesioni**

Nelle dighe prive di giunti permanenti lesioni verticali possono essere causate da dissipazione del calore di idratazione e quindi aggravate da variazioni di temperatura stagionali.

Lesioni orizzontali del paramento di monte, nelle dighe con giunti e quindi con funzionamento a gravità puro, possono essere l'evoluzione di tensioni di trazione conseguenti a sezioni strutturali inadeguate; l'acqua dell'invaso che invade la lesione con pressione idrostatica modifica in senso peggiorativo l'assetto statico della struttura.

La parzializzazione della sezione incrementa le tensioni di compressione a valle cosicché può venire superata la resistenza della muratura con schiacciamenti di questa.

Alla stessa conseguenza, sui piani verticali radiali, può portare un fenomeno espansivo molto avanzato in una diga senza giunti.

## **4.2 – IL SISTEMA DI TENUTA E DI DRENAGGIO**

### **4.2.1 – La perdita di tenuta**

Il problema che ha afflitto la quasi totalità delle dighe di muratura è la perdita della tenuta ed è anche quello che, nella grande maggioranza dei casi, ha impegnato i gestori in ripetuti e a volte impegnativi interventi.

Lesioni del corpo della diga possono estendersi alla struttura di tenuta ed essere all'origine di perdite localizzate anche vistose; mancano però riscontri di questa causalità.

Sulla disconnessione dei paramenti di bolognini ha avuto grande influenza la diversità tra i coefficienti di dilatazione di pietrame e malta; a questo si è sovrapposta l'azione del gelo. La malta o il conglomerato a volte posti a tergo, fortemente porosi, come la miscela usata per le iniezioni, a causa degli elevati rapporti A/C adottati, sono stati poi

dilavati dal flusso di permeazione esaltato dalla forte cadente piezometrica. Alcune disconnessioni di bolognini limitrofi alle travi coprigiunto sono state attribuite ad insufficiente deformabilità del materiale di interposizione tra trave e muratura.

L'elevato gradiente termico corticale generato dalle variazioni giornaliere di temperatura ( a volte aggravato da esposizione sfavorevole) è alla base dell'ammaloramento dell'intonaco e del suo distacco dalla superficie del corpo diga.

Sembra che all'origine del degrado delle voltine dei manti Levy siano state lesioni della struttura di origine termica sia in chiave che alle reni delle voltine; lesioni che ovviamente si estendevano all'intonaco di tenuta e ne rendevano precarie le riparazioni.

Sui due manti di calcestruzzo sono state rilevate cavillature di origine termica, nessun inconveniente sul muro; il manto di acciaio è stato sostituito nel 1971 e, malgrado sia privo di protezione catodica, non ha subito altri importanti interventi.

Al degrado delle strutture di tenuta consegue un aumento delle perdite peraltro non sempre correttamente segnalate dalle stazioni di misura a causa di dispersioni in fondazione e nel corpo della diga.

#### **4.2.2 – L'ostruzione dei drenaggi**

La funzione drenante a volte manca completamente perché mancano le canne e anche dove sono presenti è spesso compromessa dalla loro ostruzione totale o parziale a causa di depositi carbonatici e di ripetute iniezioni di impermeabilizzazione del paramento di monte raramente seguite da operazioni di ripristino della pervietà verso le canne stesse.

Resta il fatto che le forti perdite, verificatesi in molti casi, hanno in gran parte e per lungo tempo superato il sistema drenante interessando il corpo della diga.

## **5 – LE INDAGINI E LA CARATTERIZZAZIONE DELLA MURATURA**

Le dimensioni del pietrame costituiscono una difficoltà insormontabile, nella pratica corrente, per il prelievo di campioni rappresentativi della muratura e poi per sperimentare su di essi.

È quindi opportuno chiarire che i risultati delle prove ai quali si fa riferimento (salvo diversa indicazione) sono ottenuti da provini di piccole dimensioni i quali non rispettano le dimensioni minime né rappresentano la composizione reale della muratura.

Forniscono indicazioni sulle caratteristiche dell'ammasso alcuni indici di qualità

per i quali però manca una taratura specifica sulla muratura che consenta, come per le rocce e i calcestruzzi, di associare a questi indici una scala di valori qualitativi:

- RQD: è indice della qualità del legame tra pietrame e conglomerato
- Prove Lugeon: segnalano la diffusione di “grandi vuoti” interconnessi.

Le velocità soniche sono un indice della “compattezza” della muratura; le tomografie consentono di differenziare parti con caratteristiche diverse della diga.

I valori medi dei tomogrammi di 10 dighe (la diga n° 10 è di calcestruzzo) sono riportati in fig. 1; è interessante osservare le minori velocità nelle tomografie verticali.

## **5.1 – LA COMPOSIZIONE DELLA MURATURA**

Se si dispone di uno sviluppo di carotaggio rappresentativo della composizione del corpo della diga, le percentuali di pietrame e conglomerato delle carote possono essere estese all’ammasso murario; i risultati relativi a 17 dighe esaminate con modalità e criteri omogenei indicano che il rapporto è compreso, con prevalenza dell’una o dell’altra componente:

- per 12 dighe tra il 40 ed il 60%
- per 3 dighe tra il 35 ed il 65%
- per 2 dighe tra il 25 ed il 75%

## **5.2 – IL PESO DI VOLUME**

L’importanza che il peso di volume ha nella stabilità delle dighe a gravità giustifica delle indagini piuttosto impegnative.

Come si nota dal confronto tra i pesi di volume nei grafici delle figg. 2 e 3, non ha significato la misura su provini di laboratorio la cui composizione non rispecchia i reali rapporti tra pietrame e conglomerato (né può tener conto dei “grandi vuoti”).

Risultati attendibili si sono ottenuti con procedure più complesse:

- per somma dei pesi di volume del pietrame e del conglomerato, determinati in laboratorio, sommati secondo le percentuali risultanti dalle colonne stratigrafiche;
- per pesata idrostatica di tutte le carote.

L’affidabilità dei risultati dipende dalla disponibilità di un carotaggio rappresentativo.

In fig. 2 sono riportati i valori dei pesi di volume (massa volumica) di pietrame e conglomerato e della loro media pesata secondo le percentuali ricavate dalle colonne

stratigrafiche di 17 dighe (la n° 10 è di calcestruzzo) ed i pesi di volume ricavati per pesata idrostatica (su 9 dighe).

### **5.3 – LE RESISTENZE**

Non si dispone di misure dirette delle resistenze della massa muraria; si fa quindi riferimento alle prove condotte su “piccoli” provini che forniscono generalmente la resistenza del conglomerato quale elemento più debole; non sempre però l'estensione dei risultati alla muratura può considerarsi cautelativa poiché non è noto in quale misura influisce la qualità del legame tra pietrame e conglomerato.

Nel grafico di fig. 3 sono riportati i valori della resistenza a compressione correlati con il peso di volume del provino di 15 dighe (la n° 10 è di calcestruzzo); se si esclude la n°15 di caratteristiche estremamente scadenti, si osserva che:

- nessuna correlazione esiste tra le due grandezze
- i valori medi della resistenza di ogni diga variano da 16 a 40 MPa
- i valori delle misure dei singoli provini sono invece molto più dispersi; a ciò conseguono valori molto bassi della resistenza caratteristica se si fa riferimento al frattile 5% come per le strutture “sottili” di cemento armato.

Più complesso è il problema della resistenza a trazione che può essere seriamente compromessa anche da piccole imperfezioni o discontinuità del materiale.

Il punto critico è rappresentato dalle superfici del pietrame normalmente alle quali si dovrebbero verificare in genere i più bassi valori della resistenza a trazione; d'altra parte le pochissime prove di cui si ha notizia, comunque con risultati sempre molto modesti, non interessano probabilmente le superfici di contatto e quindi non sono rappresentative di un'ampia parte della sezione resistente; di fatto un contatto degradato riduce la superficie resistente a trazione.

Anche la resistenza a taglio della muratura è fortemente condizionata dalla adesione tra pietrame e conglomerato; in particolare può risultare ridotto il valore della coesione.

Si conferma per tutte le prove di resistenza la grande difficoltà di operare direttamente su provini di muratura rappresentativi.

### **5.4 – IL MODULO**

I valori medi del modulo statico determinati su provini di laboratorio sono compresi

tra 15.000 e 30.000 MPa; i valori delle singole misure sono molto dispersi ma crescenti con la resistenza a compressione.

Sul modulo della muratura influiscono oltre ai moduli del conglomerato e del pietrame e quindi le relative percentuali, i contatti difettosi tra questi e la presenza dei “grandi vuoti”; non è quindi dato di sapere in che misura il modulo ricavato da “piccoli” provini possa essere considerato rappresentativo di quello dell’ammasso.

Una valutazione più realistica si dovrebbe ottenere con prove dilatometriche.

## **5.5 – LE CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ**

Le grandi perdite non avvengono a causa di elevata permeabilità della struttura di tenuta ma per un “guasto” più o meno esteso di questa: dissesti dei bolognini, distacchi, fessurazioni e lesioni di intonaci e muri, perforazioni o strappi di manti di acciaio o di materie sintetiche, danni al contatto con la struttura di fondazione, etc.

Queste perdite si diffondono nel corpo della diga attraverso i “grandi vuoti” rappresentati da discontinuità in genere al contatto con il pietrame e con la roccia di fondazione, mentre irrilevante, ai fini del deflusso delle perdite, è come si è visto il contributo della porosità del conglomerato; pertanto le prove di permeabilità di laboratorio su quest’ultimo non forniscono alcuna indicazione sulla permeabilità dell’ammasso; significative sono invece le prove Lugeon.

D’altra parte porosità e permeabilità del conglomerato sono determinanti per la progressione del dilavamento del conglomerato stesso e per il degrado della struttura di tenuta, complice il gelo.

## **6 – LE DERIVE**

Con riferimento alle misure di collimazione, presenti in quasi tutte le dighe, si è osservata, in molti casi, una deriva verso monte confermata da altre osservazioni meno frequenti (rilievi trigonometrici, pendoli, trivec); le misure di livellazione, ove presenti, segnalano nelle stesse dighe un sollevamento del coronamento.

Esclusa ogni causa di errore, il fenomeno è stato attribuito ad una reazione chimica espansiva; il conseguente spostamento del coronamento è ovviamente verso l’alto ma anche verso monte per il maggiore sviluppo del paramento di valle; alcuni autori sostengono che sia anche per la maggiore intensità della reazione in presenza di ossigeno

(oltre che dell'umidità).

Si manifesta come una deriva (per analogia è detta "deriva termica") un fenomeno di espansione o di contrazione conseguente ad una variazione pluriennale dello stato termico della struttura; il termine "deriva" è improprio poiché trattasi di un fenomeno reversibile.

Nelle considerazioni che seguono non si tiene conto delle deformazioni indotte dal carico idrico.

Nel caso di gestione uniforme negli anni del serbatoio la temperatura media ambientale determina la configurazione media e quindi un valore medio annuale della collimazione costante e rappresentato da una retta parallela all'asse dei tempi intorno alla quale le variazioni stagionali di temperatura inducono periodici spostamenti.

Quando la retta non è parallela all'asse dei tempi è in atto una deriva:

- da reazione chimica sempre espansiva: questo induce una velocità di spostamento verso monte costante (o variabile molto lentamente) nel tempo; quindi la sua presenza è segnalata da una inclinazione costante della retta che rappresenta il valore medio della collimazione;
- di natura termica dovuta ad una variazione dello stato termico della struttura; poiché la temperatura media ambientale non subisce modifiche apprezzabili nei tempi che qui interessano, la variazione può essere dovuta solo a modifiche strutturali o a cambiamenti nella gestione del serbatoio.

Infatti quando viene sostituita la struttura di tenuta e/o vengono modificati i livelli massimi e i tempi di riempimento annuale del serbatoio, si altera l'esposizione ai fattori ambientali della diga che tenderà ad assumere una nuova configurazione, tendenza rappresentata da una "deriva termica" della media annuale della misura di collimazione; quando viene raggiunta la nuova situazione di equilibrio questa sarà rappresentata da una retta parallela a quella originaria precedente alla turbativa; se mancano modifiche strutturali e viene ripristinata la gestione corrente del serbatoio, la "deriva termica" si annulla con il ritorno alla retta originaria.

Le "derive termiche" si inseriscono quindi come fasi di accelerazione o decelerazione su un andamento costante o si sovrappongono ad una deriva di espansione.

L'analisi del fenomeno è molto complessa e ad essa non è applicabile una procedura generale ma è da svolgere caso per caso a motivo delle più svariate circostanze che possono influenzarlo: modifiche strutturali, esposizione dei paramenti, nuova gestione del serbatoio, penetrazione della variazione termica all'interno della struttura al prolungarsi

della turbativa, etc.

Intense “derivate termiche” sono segnalate in occasione della vuotatura totale del serbatoio; la sostituzione della struttura di tenuta con una termicamente diversa (un manto di Levy o un intonaco con un muro di calcestruzzo), induce una variazione definitiva dello stato termico e quindi la struttura non torna più alla configurazione originaria.

A volte non sono disponibili le misure dei primi anni dopo la costruzione; per alcune dighe è comunque accertato che una deriva, senza componenti termiche, è in atto da molti decenni; la velocità è in genere modesta intorno a 0,25 mm/anno e quasi mai superiore a 0,50 mm/anno; non sono stati rilevati danni alle strutture o degrado delle caratteristiche della muratura.

## **7 – LA STABILITA’**

I difetti più frequenti che influiscono negativamente sulla stabilità di queste dighe sono:

- una sezione trasversale ristretta per aver ignorato alcune azioni in fase di progettazione (azioni sismiche, pressioni interstiziali);
- un peso di volume minore del previsto per aver sopravvalutato la percentuale di pietrame e per lo scarso costipamento;
- delle pressioni interstiziali elevate per le perdite del manto e delle fondazioni e per la mancanza o l'ostruzione del sistema di drenaggio;
- l’“invecchiamento” del conglomerato specialmente per dilavamento

Le conseguenze riguardano:.

- trazioni elevate sul paramento di monte che possono evolvere facilmente in fessurazioni le quali, se estese alla struttura di tenuta, sono esposte alla piena pressione idrica dell’invaso con modifica dell’assetto statico della sezione;
- riduzione della stabilità allo scorrimento.

Relativamente alla curvatura planimetrica, è certo che essa fornisce un buon margine di sicurezza in condizioni prossime al collasso; ma il corretto funzionamento in campo elastico deve essere accertato con una verifica ad arco-gravità.

Critica potrebbe essere la stabilità allo scorrimento delle dighe a conci indipendenti che sono rimaste per lungo tempo soggette a forti permeazioni; si ricorda che la concentrazione del flusso nella parte più bassa della struttura ha certamente provocato il

dilavamento del contatto tra muratura e roccia di fondazione riducendone la coesione.

Buona parte delle dighe italiane ricade in zona sismica e molte di esse sono state soggette a sismi di diversa intensità; malgrado per nessuna di esse sia stato tenuto conto di queste azioni in fase di progettazione, nessun danno degno di segnalazione si è verificato.

Lo sviluppo delle verifiche dinamiche, necessarie oggi per controllare il grado di affidabilità almeno delle opere più importanti, incontrano grandi difficoltà nella definizione del comportamento del materiale in condizioni sismiche.

Uno studio relativamente recente sull'argomento sviluppato con un modello disaccoppiato agli elementi finiti in campo elasto-plastico basato su indagini di laboratorio su muratura ricostruita ed in sito sul corpo di una diga sottoposta a vibrazioni forzate, ha confermato la grande difficoltà che si incontra a definire una idonea legge costitutiva del materiale a causa della grande variabilità delle sue caratteristiche; comunque, oltre a confermare in linea generale il comportamento dinamico caratteristico delle dighe a gravità, il modello ha evidenziato una minore criticità nella stabilità allo scorrimento probabilmente per effetto di una elevata dilatanza.

## **8 – GLI INTERVENTI**

### **8.1 – LE INIEZIONI NEL CORPO DELLA DIGA**

Tra i numerosi tipi di interventi finalizzati unicamente alla stabilità dell'opera (tiranti, appesantimento del coronamento o del paramento di valle, strutture di contrasto o rilevati a valle), l'unico adottato in tempi recenti nelle dighe italiane è l'iniezione della muratura con miscele di cemento; i risultati sono stati in genere modesti. Un miglioramento apprezzabile delle caratteristiche meccaniche della muratura è raggiungibile solo avvicinandosi alla saturazione con fori molto ravvicinati e con una particolare attenzione ai materiali, alle miscele da iniettare e alle modalità di iniezione; in considerazione del volume dei vuoti di queste strutture, gli aspetti economici limitano l'estensione di questo tipo di intervento.

### **8.2 – LA TENUTA DEL PARAMENTO**

Il miglioramento della tenuta è fondamentale anche per gli effetti positivi diretti o indiretti sulla stabilità.

Oltre agli interventi di manutenzione e di ripristino della struttura di tenuta esistente

eseguiti a più riprese sulla quasi totalità delle dighe, in molti casi si è provveduto alla sostituzione con una struttura diversa da quella originaria; nella tabella che segue sono riportati i tipi di paramento originari e come sono stati sostituiti.

Paramento originario	Paramento attuale	Totale n.	n.	%
Manto di Levy	Originario	5	1	20
	Muro di calcestruzzo		4	80
Bolognini	Originario	21	11	52
	Gunita		3	14
	Schermo di iniezioni		1	5
	Muro di calcestruzzo		2	10
	Manto di acciaio		3	14
	Manto di PVC		1	5
Intonaco	Originario	31	22	71
	Gunita		6	20
	Muro di calcestruzzo		2	6
	Manto di acciaio		1	3
Manti o muri di calcestruzzo	Originario	3	3	100
Manto di acciaio	Originario	1	1	100

### 8.2.1 – Le iniezioni di paramento

Costituiscono il più vecchio e in genere il primo intervento adottato anche in tempi recenti; fori corti (0,70÷1,50 m), eseguiti dal paramento nella misura di uno ogni uno o due metri quadrati, vengono iniettati con miscele di cemento nell'intento di impermeabilizzare per saturazione uno strato di muratura dietro il paramento; intervento mai sostitutivo ma solo integrativo di un'altra struttura di tenuta (intonaco o bolognini).

Analogo intervento, che però evita la vuotatura dell'invaso, è la creazione di uno schermo, in prossimità del paramento di monte, con iniezioni dal coronamento adottando gli stessi criteri e gli stessi materiali.

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 diffusione solo parziale sono i motivi del ripetersi di clamorosi insuccessi: a distanza di poco tempo (a volte qualche anno, a volte anche meno)

le perdite aumentano di nuovo sempre più rapidamente a causa del dilavamento, imponendo un nuovo intervento.

Questa successione di iniezioni ha portato in molte dighe all'ostruzione parziale o totale delle canne drenanti con l'illusoria riduzione delle perdite misurate ma con l'incremento degli affioramenti sul paramento di valle.

In un unico caso recente l'impiego di microcementi e di superfluidificanti unitamente ad una accurata sperimentazione per definire miscele, successione dei fori e modalità di iniezione, ha consentito di raggiungere una tenuta pressoché totale che costituisce l'unica garanzia di durata dell'intervento.

### **8.2.2 – La stilatura dei bolognini**

Efficaci si sono dimostrati gli interventi costituiti da una scarnitura, anche su vaste superfici, della malta degradata, da una nuova stilatura con malte speciali antiritiro e dall'ancoraggio con ferri di una certa percentuale di bolognini.

### **8.2.3 – Il rifacimento dell'intonaco**

Di breve durata è risultato il ripristino dei manti Levy a causa delle lesioni della struttura di supporto.

La sostituzione di parti ammalorate e distaccate o il rifacimento completo di un vero e proprio intonaco non ha portato in genere risultati durevoli.

Una soluzione di successo è costituita da un manto di gunita in più strati (a volte anche impiegato sovrapposto ad un paramento di bolognini), previa la completa demolizione dell'intonaco; la realizzazione di giunti di contrazione, l'interposizione di un'armatura metallica tra gli strati ed un fitto ancoraggio al corpo diga, riducono fortemente il pericolo di fessurazioni e di distacchi di origine termica dalla muratura retrostante.

### **8.2.4 – Il muro**

Il muro è una struttura di calcestruzzo armato gettata contro il paramento di monte e resa solidale al corpo diga con ancoraggi metallici; di spessore in genere crescente dalla sommità alla base è sempre suddiviso da giunti verticali e solo in qualche caso anche da giunti orizzontali; oltre a risolvere il problema della tenuta, porta un rilevante contributo alla stabilità.

I muri hanno frequentemente presentato una sottile e diffusa fessurazione orizzontale; la causa principale è di natura termica; l'accoppiamento rigido comporta coazioni tra le due strutture che sono di trazione per il muro sia in fase di costruzione per il ritiro conseguente alla dissipazione del calore di idratazione sia in esercizio d'inverno se, come spesso accade, il serbatoio è mantenuto vuoto.

La presenza di giunti orizzontali attenua o elimina questi problemi ma nei riguardi della stabilità limita la funzione del muro riducendo il suo contributo al solo peso.

#### **8.2.5 – Il manto di acciaio**

In due casi il manto di acciaio non ha presentato particolari inconvenienti.

In un terzo caso il manto ha funzionato perfettamente per circa 30 anni durante i quali si è sviluppato un processo di corrosione che, nel 1997, ha completato la perforazione dei primi crateri; da allora agli interventi di rappezzo si sovrappone la perforazione di nuovi crateri; si precisa che l'impianto di protezione catodica è andato fuori servizio poco dopo la posa in opera.

#### **8.2.6 – Il manto di PVC**

A copertura di un paramento di bolognini è stato adottato un manto costituito da teli di PVC accoppiati ad un geotessile; dopo qualche anno si sono verificati degli inconvenienti (perforazioni, strappi) che hanno richiesto interventi di manutenzione straordinaria.

#### **8.2.7 – I trattamenti superficiali**

I trattamenti superficiali, generalmente eseguiti con l'impiego di resine, si sono dimostrati efficaci nei confronti di fessure capillari su superfici lisce: intonaci e calcestruzzi.

È importante che il fenomeno che ha portato alla fessurazione sia esaurito e che il movimento delle fessure sia limitato.

### **8.3 – LA TENUTA IN FONDAZIONE**

In tutte le dighe nelle quali è stato rifatto o sostituito il manto di tenuta del paramento è stato realizzato uno schermo in fondazione intestato sul muro di piede del nuovo manto.

### **8.4 – IL SISTEMA DRENANTE**

Si segnalano interventi di pulizia e, a volte, di riperforazione delle canne drenanti esistenti nel corpo diga. Solo in alcuni casi si è approfittato della esistenza di un cunicolo di piede per realizzare delle canne drenanti in fondazione.

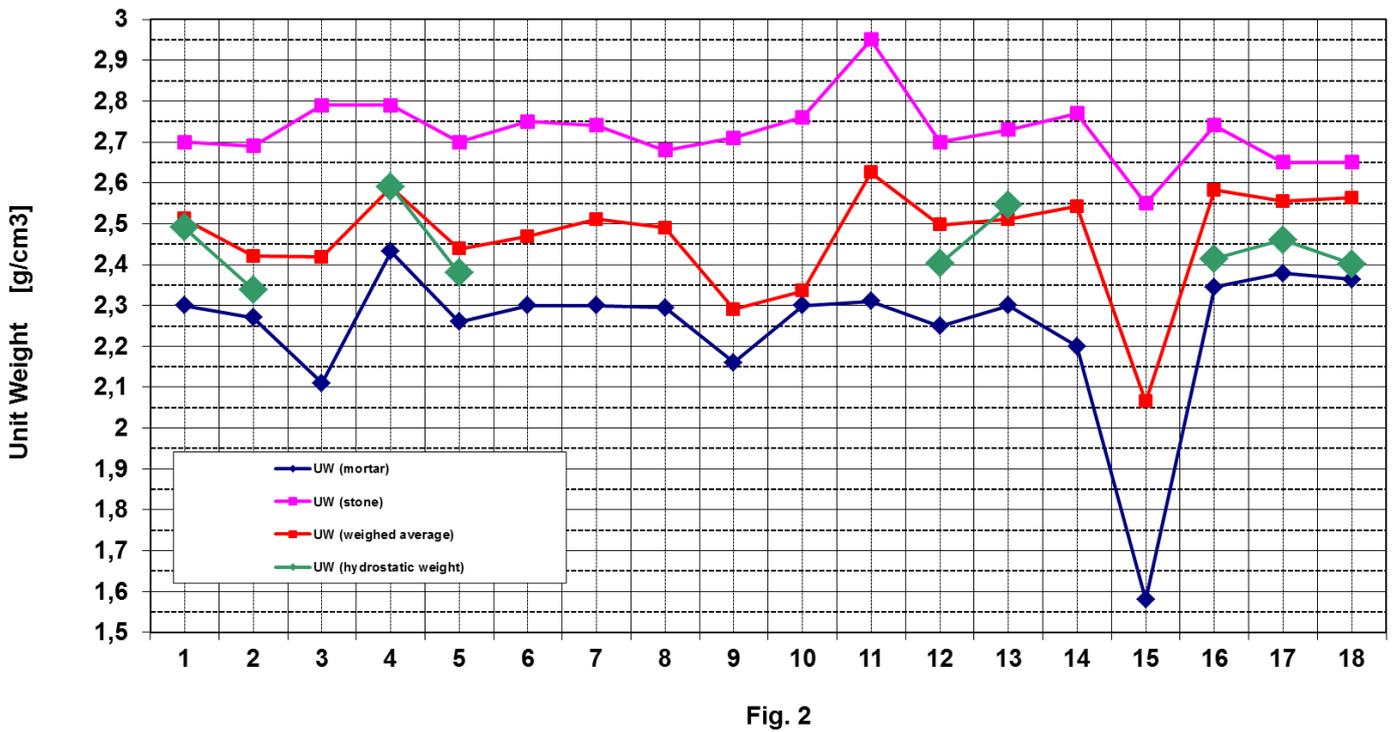
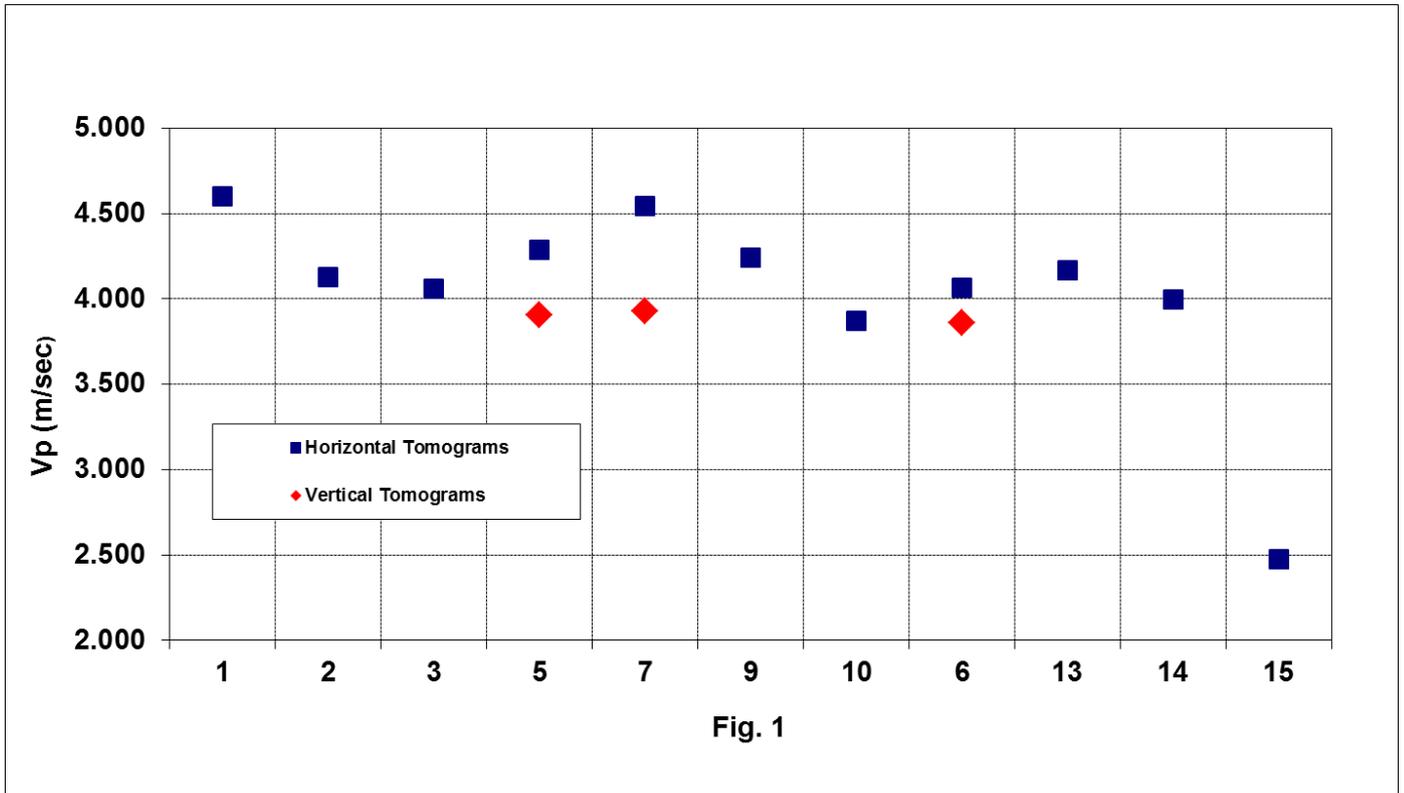
La costruzione di un muro di adeguato spessore ancorato al paramento di monte ha consentito di ricavare al suo interno un cunicolo di piede e quindi di realizzare un sistema drenante sia in elevazione, al contatto tra le due strutture, sia in fondazione con perforazioni. Non si hanno esempi in Italia di apertura di un cunicolo nel corpo della diga esistente o nelle sue fondazioni; scarsi risultati hanno avuto i tentativi di realizzare un sistema drenante con fori inclinati dal paramento di valle.

## INDICE

1 – INTRODUZIONE .....	1
2 - LA TIPICA DIGA DI MURATURA .....	2
2.1 – LA MURATURA.....	4
2.2 – IL SISTEMA DI TENUTA.....	5
2.2.1 – Del paramento .....	5
2.2.2 – Della fondazione .....	5
2.3 – IL SISTEMA DI DRENAGGIO .....	6
2.3.1 – Del corpo della diga .....	6
2.3.2 – Delle fondazioni .....	6
3 – L’INVECCHIAMENTO ED IL DEGRADO .....	7
3.1 – LE CAUSE ORIGINARIE DEL DEGRADO .....	7
3.1.1 – Le carenze progettuali.....	7
3.1.2 – Le carenze esecutive .....	8
3.2 – LE CAUSE DIRETTE DEL DEGRADO.....	8
3.2.1 – Le reazioni chimiche tra i materiali della muratura (AAR, ASR...) .....	8
3.2.2 – Le reazioni chimiche con l’ambiente.....	8
3.2.3 – Le reazioni fisiche con l’ambiente .....	8
3.2.4 I carichi statici: permanenti e ripetuti .....	9
4 – GLI EFFETTI DEL DEGRADO.....	10
4.1 – LA MURATURA.....	10
4.1.1 – La riduzione del peso di volume.....	11
4.1.2 – Le variazioni di volume.....	11
4.1.3 – La riduzione della resistenza e del modulo.....	11
4.1.4 – L’aumento della permeabilità .....	11
4.1.5 – L’incremento delle pressioni interstiziali e delle sottopressioni .....	11
4.1.6 – Le lesioni.....	12
4.2 – IL SISTEMA DI TENUTA E DI DRENAGGIO.....	12
4.2.1 – La perdita di tenuta .....	12
4.2.2 – L’ostruzione dei drenaggi .....	13
5 – LE INDAGINI E LA CARATTERIZZAZIONE DELLA MURATURA .....	13
5.1 – LA COMPOSIZIONE DELLA MURATURA .....	14
5.2 – IL PESO DI VOLUME .....	14
5.3 – LE RESISTENZE .....	15

5.4 – IL MODULO .....	15
5.5 – LE CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ .....	16
6 – LE DERIVE.....	16
7 – LA STABILITA’.....	18
8 – GLI INTERVENTI.....	19
8.1 – LE INIEZIONI NEL CORPO DELLA DIGA.....	19
8.2 – LA TENUTA DEL PARAMENTO .....	19
8.2.1 – Le iniezioni di paramento .....	20
8.2.2 – La stilatura dei bolognini .....	21
8.2.3 – Il rifacimento dell’intonaco.....	21
8.2.4 – Il muro.....	21
8.2.5 – Il manto di acciaio .....	22
8.2.6 – Il manto di PVC .....	22
8.2.7 – I trattamenti superficiali .....	22
8.3 – LA TENUTA IN FONDAZIONE .....	22
8.4 – IL SISTEMA DRENANTE .....	22

FIGURE



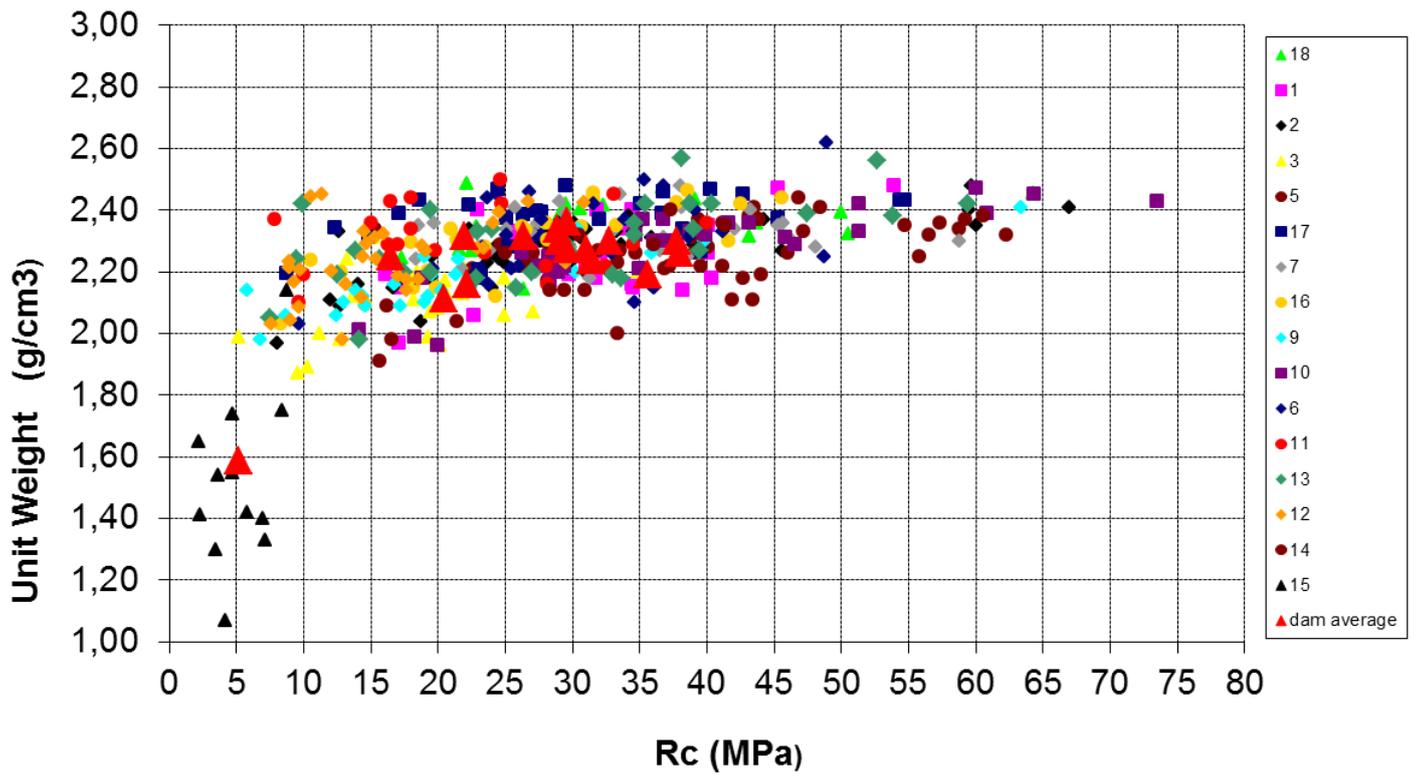


Fig. 3