

**Titolo:** MODELLO NUMERICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE DELLE FESSURE DOVUTE ALLA PRESSIONE IDROSTATICA NELLE GRANDI DIGHE

**Autore:** Lorenzo Da Re

**Scopo:**

La finalità dell'elaborato di tesi è stata quella di esaminare in maniera analitica e numerica la propagazione delle fessure nelle dighe a gravità in calcestruzzo. L'attività ha comportato in prima battuta la determinazione di una formulazione analitica per la valutazione della stabilità della fessura, a seguire la realizzazione di modelli bidimensionali ad elementi finiti di una sezione trasversale dello sbarramento e la successiva analisi della meccanica della frattura mediante un codice di calcolo commerciale.

In Italia, come nel resto d'Europa, lo sviluppo economico del secondo dopoguerra ha portato anche alla realizzazione di numerose dighe; si può osservare nel grafico sottostante il picco di costruzioni degli invasi sul territorio nazionale.

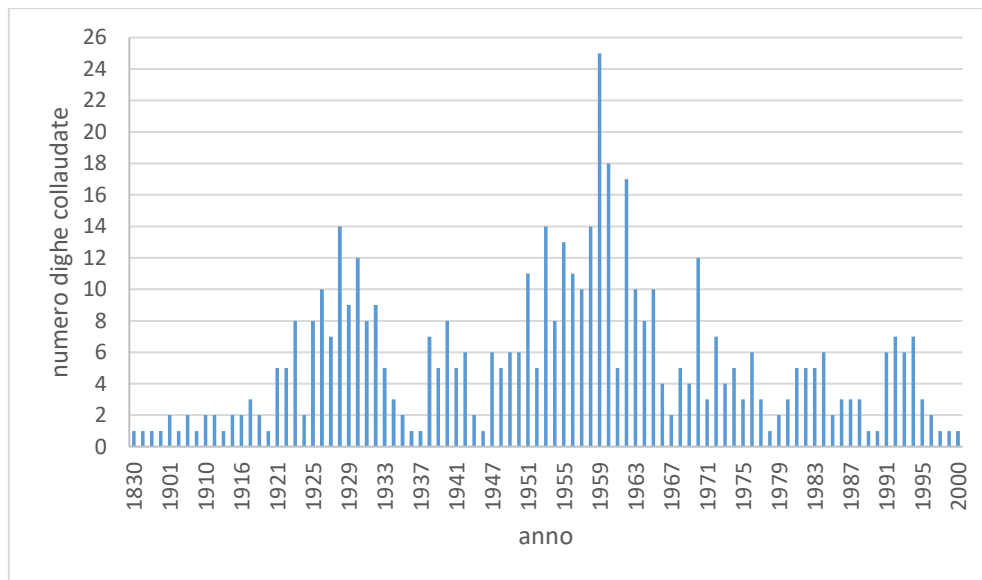


Grafico 1: numero di dighe per anno di apertura

Nell'ultimo decennio, vista la vetusta età di alcuni invasi e il loro stato di conservazione, si stanno svolgendo numerosi studi atti a conoscere il grado di durabilità e mantenimento dell'operatività degli sbarramenti esistenti.

Questa tesi intende studiare il meccanismo di fessurazione delle dighe al fine di garantire la durabilità e la vita utile del manufatto.

**Abstract:**

La vita nominale di un'opera strutturale ( $V_N$ ) è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata, cioè che mantenga specifici livelli prestazionali. La vita nominale da adottare per diversi tipi di opere, è riportata nelle NTC 2018, precisamente nella tabella Tab. 2.4.I.

L'inadeguatezza di alcune dighe a sopportare le azioni determinate da normali condizioni di esercizio (carico idrico e temperatura) si manifesta con fenomeni di fessurazione. Lo sviluppo di fessure comincia talvolta già durante la costruzione, ma l'influenza sul comportamento della diga può risultare significativa anche dopo parecchi anni. Riempimento ed esercizio del bacino comportano un'azione permanente e ripetuta del carico idrico, essa si traduce in campi di pressione e forze che sollecitano la struttura e la sua fondazione.

Nelle dighe a gravità le variazioni di livello d'invaso è la principale causa che produce ripetute variazioni di spinta idrostatica e sottospinta, che sono tra le forze più importanti agenti su tale tipo di diga. Quando la sottopressione o pressione interstiziale supera le sollecitazioni indotte dai pesi verticali, si sviluppano sforzi di trazione sul paramento di monte. Dove la resistenza a trazione è superata e in assenza di appropriate armature, si formano fessure orizzontali nel calcestruzzo. La frattura procede gradualmente verso l'interno del corpo diga e quando risultano passanti, danno luogo a filtrazioni con perdite anche elevate sul paramento di valle e al piede dello sbarramento. Le fessure possono peraltro comparire anche su dighe ben costruite o essere presenti su dighe, senza che ciò costituisca un reale inconveniente per la struttura.

I fattori determinanti per lo stato fessurativo sono:

- la qualità del calcestruzzo;
- l'ubicazione in zona di elevate variazioni termiche stagionali;
- i cedimenti differenziali delle fondazioni.

Gli obiettivi della riabilitazione nelle dighe in calcestruzzo sono in genere uno o più tra i seguenti:

- arrestare l'infiltrazione d'acqua;
- prevenire l'ulteriore deterioramento del calcestruzzo;
- ridurre le sottopressioni nel corpo diga;
- arrestare o rallentare eventuali reazioni alcali-aggregati.

Il calcestruzzo è un materiale fragile con bassa resistenza alla trazione e scarsa tenacità, in cui possono svilupparsi diversi tipi di fessure. Lo sviluppo delle fessure influisce sulla resistenza strutturale e sulla durata delle opere in calcestruzzo. Una frattura può essere definita come un'interfaccia e/o uno spazio all'interno di una struttura. La propagazione della fessura guidata dal fluido è un processo in cui una fessura esistente viene estesa a causa della pressione del fluido. Strutture in calcestruzzo come le dighe a gravità interagiscono costantemente con la pressione idrostatica dell'invaso. Gli effetti delle fessure nelle dighe in calcestruzzo possono essere significativi e potrebbero alla fine ridurre la capacità portante della struttura o influenzarne la durata.

Nell'analisi analitica si è valutata la stabilità delle fessure e la lunghezza critica, applicando i principi e i metodi della meccanica della frattura elastica lineare (*Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM*). L'analisi in oggetto ha considerato sollecitazioni quasi statiche, quali il peso proprio del manufatto e la pressione idrostatica dell'acqua dell'invaso. Si è applicato tale metodo assumendo che il comportamento fessurativo del calcestruzzo sia analogo a quello dei materiali metallici, nell'ipotesi che la zona non lineare all'apice della fessura, dove avviene una parziale trasmissione di sollecitazioni a causa del danneggiamento e del parziale ingranamento degli inerti, sia piccola rispetto le dimensioni dello sbarramento. Di solito questa condizione, non è soddisfatta per la maggior parte delle strutture in calcestruzzo, possiamo ritenerla, con una buona approssimazione, valida nelle grandi strutture, quali ad esempio le dighe

Per quanto riguarda l'analisi numerica sono stati utilizzati modelli ad elementi finiti per studiare la propagazione delle fessure causate dalla pressione idrostatica interna alle fratture. Si sono definiti 2 modelli: *contour-integral model* e *cohesive-interaction model* per lo studio della propagazione delle fessure e della distribuzione della pressione all'interno delle fratture nelle dighe a gravità.

Nelle simulazioni numeriche, per determinare i carichi critici di pressione che causano la propagazione della frattura, è stato utilizzato materiale elastico-lineare. Queste grandezze della pressione critica sono state quindi utilizzate come valori di input per studiare la distribuzione della pressione lungo la propagazione della fessura.

La distribuzione della pressione varia lungo la propagazione della cricca. Quando si viene a formare una fessura, la pressione si sviluppa come distribuita uniformemente e aumenta leggermente per continuare la propagazione. Successivamente, la pressione diminuisce a causa dell'aumento dell'area di frattura e segue lo stesso schema lungo la propagazione fino a raggiungere la separazione totale del campione.

In conclusione si sono confrontati le soluzioni analitiche con i risultati numerici per validare i dati ottenuti dalla simulazione.

A coronamento dello studio di tesi si sono analizzati possibili interventi per il ripristino dell'impermeabilizzazione del paramento di monte.

## **Indice:**

### **1. SCOPO**

### **2. INTRODUZIONE**

### **3. OPERE DI SBARRAMENTO**

#### *3.1 LEGISLAZIONE*

#### *3.2 FUNZIONI DELLE DIGHE*

### **4. CLASSIFICAZIONE DELLE DIGHE SECONDO D.M. 26 GIUGNO 2014**

#### *4.1 DIGHE A GRAVITÀ*

#### *4.2 DIGHE A VOLTA*

#### *4.3 DIGHE IN MATERIALI SCIOLTI*

### **5. DEFINIZIONI SECONDO LE NORME TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE E LA COSTRUZIONE DEGLI SBARRAMENTI DI RITENUTA (DIGHE E TRAVERSE)**

### **6. CRITERI DI COLLASSO**

#### *6.1 APPLICABILITÀ GENERALE*

#### *6.2 APPROCCIO RESISTENZA MECCANICA DEI MATERIALI (strength-of-materials approach)*

#### *6.3 APPROCCIO MECCANICA DELLA FRATTURA ELASTICA LINEARE*

### **7. FESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO NELLE OPERE DI SBARRAMENTO**

#### *7.1 TIPI DI FESSURE*

#### *7.2 COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO*

#### *7.3 COMPORTAMENTO A TRAZIONE DEL CALCESTRUZZO*

#### *7.4 FLUIDO NELLE FESSURE*

## *7.5 EFFETTI DELLA FESSURAZIONE*

### **8. CASO TIPO DI DIGA A GRAVITÀ**

### **9. ANALISI ANALITICA STABILITÀ DELLE FESSURE**

#### *9.1 SISTEMA EQUILIBRATO*

#### *9.2 SISTEMA NON EQUILIBRATO*

#### *9.3 CONFRONTO SISTEMI*

#### *9.4 SISTEMA CON FESSURA PRESTABILITA*

### **10. ANALISI NUMERICA STABILITÀ DELLE FESSURE**

#### *10.1 MODELLO BIDIMENSIONALE A ELEMENTI FINITI*

#### *10.2 MODELLAZIONE DELLA FESSURA*

#### *10.3 MODELLAZIONE DELLA FESSURA PREDEFINITA*

#### *10.4 INTERAZIONI*

#### *10.5 CARICHI*

#### *10.6 GEOMETRIA DEL MODELLO*

#### *10.7 PROPRIETÀ DEL MATERIALE*

#### *10.8 CARICO*

#### *10.9 INTERFACCIA E CONDIZIONI AL CONTORNO*

#### *10.10 MESHING*

#### *10.11 MESH REFINEMENT*

#### *10.12 RISULTATI NUMERICI*

### **11. CONFRONTO RISULTATI**

### **12. CONCLUSIONI**

#### *12.1 INTERVENTI*

#### *12.2 SVILUPPI FUTURI*

### **BIBLIOGRAFIA**