

ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

Convegno

Problemi Strutturali nell'ingegneria delle Dighe

26 e 27 FEBBRAIO 2004

RIASSUNTI DEGLI INTERVENTI



ROMA

PALAZZO CORSINI - VIA DELLA LUNGARA, 10

Indice

Mario BERRA	pag. 31
Paolo BERTACCHI	pag. 48
Luca BOLOGNINI	pag. 16
Nicola BRIZZO	pag. 34
Luciano BULLINI	pag. 58
Carlo CALLARI	pag. 27
Michele CAPUTO	pag. 42
Cesare CARINI	pag. 50
Luigi COPPOLA	pag. 53
Claudio DATEI	pag. 8
Adriano DE SORTIS	pag. 41
Giulio DI LEMMA	pag. 33
Michele FANELLI	pag. 13
Costantino FASSO'	pag. 45
Raimund GAISBAUER	pag. 11
Pietro GROPPA SEMBENELLI	pag. 51
Ruggiero JAPPELLI	pag. 6
Giovanni LOMBARDI	pag. 4
Carlo LOTTI	pag. 61
Giulio MAIER	pag. 19
Aldo MARCELLO	pag. 55
Guido MAZZA'	pag. 15
Giorgio NOVATI	pag. 29
Paolo PAOLIANI	pag. 39
Rita PELLEGRINI	pag. 37
Renzo ROSSO	pag. 57
Giovanni RUGGERI	pag. 43
Victor SAOUMA	pag. 17
Bernardo SCHREFLER	pag. 22
Giorgio SQUINZI	pag. 3
Lucio UBERTINI	pag. 56
Silvio VALENTE.....	pag. 24

Collaborazione tra mondo accademico e mondo imprenditoriale: una strada obbligata per il rilancio della competitività del sistema paese

La necessità di aumentare la competitività del nostro sistema produttivo facendo leva su Ricerca & Innovazione è un tema che Confindustria sta cercando di porre al centro del dibattito politico ed economico in Italia e in Europa.

L'urgenza di muoverci in questa direzione ci viene dall'esame dello scenario economico internazionale che evidenzia la perdita di competitività dell'Europa rispetto a Stati Uniti e Giappone, ma anche rispetto ai nuovi paesi emergenti, primo fra tutti la Cina.

Quote di mercato e occupazione dipendono sempre più dalla capacità di differenziare i propri prodotti accrescendone il contenuto tecnologico.

Il traguardo del 3% di investimenti in ricerca sul PIL, condiviso dall'Unione Europea a Lisbona, può essere considerato un obiettivo simbolico. Il traguardo vero è costruire un sistema che crei le condizioni per un aumento sostanziale dell'attività di ricerca, sia pubblica che privata.

In questo quadro un tassello fondamentale è la collaborazione del sistema di ricerca pubblico con le imprese.

È necessario aumentare la quantità e la qualità delle risorse pubbliche destinate al finanziamento della ricerca e allo stesso tempo assicurare che le risorse disponibili siano allocate in base al merito, premiando e sviluppando le eccellenze a livello internazionale e introducendo meccanismi premianti che favoriscano progetti congiunti tra mondo accademico e mondo imprenditoriale.

La collaborazione tra la ricerca pubblica e privata non significa penalizzare la ricerca di base rispetto alla ricerca applicata o limitare la libertà creativa delle Università e dei centri di ricerca pubblici. Bisogna superare distinzioni troppo rigide che sono state invocate per tenere i due mondi separati, e assicurare una continuità e un collegamento logico e progettuale tra due momenti di un processo innovativo necessariamente unico.

Anche a livello europeo ritengo che sia giunto il momento di dare un segnale forte e deciso nella direzione dell'economia della conoscenza, sia escludendo gli investimenti in Ricerca e Innovazione dal calcolo del debito pubblico ai fini del "Patto di stabilità e crescita", sia destinando una parte di gran lunga più significativa del budget europeo all'innovazione.

Con riferimento agli strumenti operativi è importante attivarci per eliminare gli ostacoli che rallentano la partecipazione delle imprese italiane al VI° programma quadro e fare in modo che il VII° programma quadro sia più aderente alle esigenze del mondo imprenditoriale.

Tra gli strumenti operativi futuri si sta concretizzando il concetto di piattaforma tecnologica, che riunisce tutti i soggetti esperti in una determinata tecnologia, sia nel campo della ricerca che delle imprese. Gli esempi più conosciuti sono la piattaforma nel settore aeronautico e nel settore dei trasporti su rotaia.

Questa modalità appare particolarmente importante per un settore come quello dell'ingegneria delle dighe, nel quale vi è una presenza congiunta di capacità tecnologiche e imprenditoriali e che vede l'Italia tra i paesi leaders in Europa.

Credo possa essere opportuno provare a ragionare sulla possibilità di definire una piattaforma tecnologica specializzata, proposta che Confindustria potrebbe supportare nella fase di definizione dell'idea e sostenere in sede comunitaria.

Confindustria per Ricerca & Innovazione

La modellazione nel campo delle dighe in calcestruzzo

Nei primi decenni del secolo appena concluso s'intendeva per modello della diga unicamente un modello fisico a scala ridotta. Questa definizione si usa ancora in vari campi, per esempio nell'idraulica. Solo verso la metà del secolo venne introdotto il concetto di "modello elastico" o di "modello matematico", intendendo con ciò una forma matematica suscettibile di simulare, entro certi limiti, il comportamento di un'opera di calcestruzzo che comporta anche un certo volume di roccia di fondazione.

Successivamente gli elaboratori elettronici hanno subito un enorme sviluppo che ha rivoluzionato anche la tecnica della progettazione delle dighe. Tuttavia l'evoluzione avvenne a passi progressivi. In un primo tempo si cercò di svolgere in modo automatico i calcoli numerici finora eseguiti "manualmente". Successivamente espressioni analitiche venivano semplicemente interpretate in forma numerica.

Solo più tardi, l'evoluzione straordinaria degli elaboratori elettronici, e delle loro capacità, accompagnata da una altrettanto pronunciata riduzione dei costi, condusse a sviluppare nuovi metodi di calcolo realmente "numerico" basati in un primo tempo sul metodo delle differenze finite e successivamente su quello degli elementi finiti.

L'evoluzione è tuttora in corso, con l'esame di nuovi problemi e lo sviluppo di nuovi elementi. Nondimeno, a tutt'oggi un altissimo livello è stato raggiunto e si può ormai considerare il metodo degli elementi finiti come un metodo prioritario se non quasi esclusivo da utilizzarsi per la soluzione dei problemi che qui interessano.

Dal punto di vista pratico bisogna distinguere diverse fasi di allestimento del modello.

In primo luogo si ha da fare con "modelli a priori", ossia allestiti prima della costruzione dell'opera. A quel momento moltissime incognite sussistono in merito alla futura realtà dell'opera e altrettante ipotesi semplificatrici o idealizzanti sono inevitabili.

Una volta la diga costruita, si dovrà realizzare una "modellazione a posteriori" per meglio interpretarne il comportamento e valutarne più esattamente il grado di sicurezza.

A volte può trattarsi del semplice adattamento dei parametri basilari principali del modello; altre volte sarà necessario concepire un modello ex-novo, in particolare per opere di una certa età per le quali un modello a priori non esiste.

Il monitoraggio di una grande diga è ormai consuetudine e concetto generalmente accettato nella maggioranza dei paesi. Si notano tuttavia importantissime differenze tra le singole opere in merito all'istrumentazione installata e in particolare al modo di interpretazione dei valori forniti dalla stessa.

Su base mondiale si possono distinguere vari gradi di sviluppo della tecnica di interpretazione che vanno dalla semplice lettura degli strumenti, senza ulteriore esame dei dati, fino ai sistemi più sviluppati e complessi che comportano un'analisi statistica dei valori letti, combinata con una simulazione del comportamento della diga, sulla base di un modello detto "deterministico".

Un'ulteriore fase dell'analisi consiste nell'estrapolare il comportamento della diga, in caso di condizioni di carico estreme che vanno al di là di quelle registrate durante l'esercizio normale dell'opera.

Se i metodi moderni di modellazione, ad esempio sulla base di elementi finiti, permette di ottenere risultati estremamente precisi, anche in casi assai complessi, esiste come contropartita il rischio del cattivo uso degli stessi.

L'esperienza pratica insegna di fatto che casi di tale natura sono purtroppo assai frequenti. Alcuni esempi vengono citati che vanno dall'ignoranza delle leggi fondamentali della fisica fino alla definizione di condizioni ai bordi non adeguati. Si nota purtroppo assai spesso, presso gli utenti di queste tecniche di calcolo, una totale mancanza di spirito critico

nell'ambito dell'esame dei risultati ottenuti, sempre che detto esame abbia realmente luogo.

In conclusione si può solo consigliare una maggior prudenza agli utenti, a volte anche un po' più di modestia ai progettisti e segnatamente raccomandare a tutti un più sviluppato senso critico nell'esame dei risultati delle analisi effettuate.

Lombardi Engineering Limited

Difetti delle grandi dighe e rimedi strategici

Le riserve idriche per scopi potabili, industriali, irrigui si costituiscono creando serbatoi artificiali su fiumi e torrenti con complessi *sistemi* di opere, che hanno stretti rapporti con i terreni e le acque.

Per un esercizio sicuro ed efficiente, specie nei periodi di emergenza, le *opere*, i *terreni* e le *acque* richiedono la massima cura con attenta vigilanza, che deve esercitarsi con visione unitaria del funzionamento del sistema; a tal fine, è necessario prevedere le imperfezioni e i ricorrenti guasti, ai quali si deve porre rimedio. Questi *difetti* possono definirsi come deviazioni del comportamento del sistema da quello prevedibile con convenzionali valutazioni secondo schemi ideali e si riconoscono da sintomi, che spesso non si appalesano con evidenza.

Le conseguenze dei difetti discendono raramente da fenomeni isolati; più spesso, si configurano come catene di fenomeni ed effetti, che si designano *indesiderabili*, ai quali si attribuisce la responsabilità della transizione del sistema verso stati limiti di *servizio* o addirittura *ultimi*.

Per la difficile ricerca delle *cause* e per la figurazione degli *effetti* dei difetti si possono seguire classiche regole generali, ma in pratica conviene applicare una *strategia progettuale* basata sulla invenzione di *temuti* difetti *credibili*, perché *accertati* in circostanze simili, per prevederne con adeguate simulazioni gli effetti sul comportamento del sistema e per proteggere i manufatti anche nell'ipotesi che i difetti *immaginati* si manifestino effettivamente. Questi, dei quali si propone una rassegna, appartengono ormai alla classe di conoscenza di fenomeni, della cui possibile esistenza si è consapevoli, che ad un progettista si chiede di prevedere. Al progettista, dunque, il compito di estendere la classe dei fenomeni *previsti* fino a comprendere tutto il *prevedibile*.

In linea di principio, tale compito non offre difficoltà per un responsabile progettista "esperto"; in pratica, tuttavia, e malgrado ogni attenzione e scrupolo, nei limiti imposti dalle circostanze e dalle conoscenze individuali, esso non può essere assolto compiutamente. Ne segue che, spesso, il previsto è ancora limitato rispetto al prevedibile, che a sua volta trova i suoi limiti nelle lacune delle attuali conoscenze generali sul comportamento, con particolare riguardo alla durata, delle opere.

La strategia mira ad istituire razionali, ancorché laboriose *analisi* in luogo della tanto spesso cieca attribuzione di coefficienti o margini di sicurezza. Di questa strategia si propongono i lineamenti con esempi, discutendone l'impatto sulle norme, che meriterebbero perciò una nuova impostazione.

I *rimedi* sono suddivisi in *convenzionali* e *strategici*.

I primi comprendono *impermeabilizzazione*, *drenaggio*, *filtraggio*, *consolidamento* nelle varie applicazioni. Per i rimedi strategici si propone la distinzione fra *strutturali* e *non strutturali*.

Fra i rimedi strategici *strutturali* si citano *separazione* delle funzioni, *zonatura* del corpo diga, *moltiplicazione* delle difese, *compartimentazione* delle perdite, *integrazione* delle soluzioni, nonché i differenti criteri per fronteggiare le *frane*, *ante mortem*, *in vita* o *post mortem*.

Con i rimedi strategici *non strutturali* si fa riferimento a varie questioni che afferiscono al *cantiere della conoscenza*: il metodo *osservazionale*, la *limitazione* dell'invaso, *l'interrompibilità* del lavoro, la *regolazione* di un fattore critico, la *vigilanza*

durante l'esercizio, la ricerca del *consenso*, la rielaborazione della *regolamentazione*, il perfezionamento dei rimedi *prescrittivi*, la dismissione del manufatto.

Difetti, cause, effetti e rimedi possono qualificarsi con una ricca famiglia di *attributi*, che ne definiscono il tipo, l'origine e la distribuzione nello spazio e nel tempo.

Nell'inesorabile processo d'invecchiamento, l'evoluzione del quadro fessurativo e delle sollecitazioni efficaci sul piano di posa ed in corrispondenza delle altre discontinuità *congenite* ed *acquisite* nelle dighe murarie, e il progresso dell'erosione interna fino alla fratturazione idraulica ed al sifonamento nelle dighe di materiali sciolti, possono tenersi sotto attento *controllo*; ma i relativi problemi, che si propongono con sempre maggiore insistenza all'attenzione dei gestori, richiederanno a lungo termine un rinnovato sforzo di ricerca, che dovrà essere basato sulla esperienza finora raccolta e su una visione unitaria del sistema diga-terreno-serbatoio.

Per il progresso nella concezione dei serbatoi necessari per il superamento dell'emergenza idrica nel Paese e per migliorare l'esercizio di quelli esistenti, saranno essenziali, un'illuminata riscrittura del Regolamento Dighe e la riconquista del *consenso* dell'opinione pubblica con la rimozione di inconsistenti luoghi comuni, in un clima di rinnovata fiducia nei servizi di stato, che sono ormai in grado di offrire una competente collaborazione durante tutto il ciclo vitale del sistema.

Nell'edizione a stampa il testo sarà corredato di esempi di *difetti constatati* in opere esistenti, di *analisi di effetti* di difetti *immaginati* a scopo di verifica ed infine di *rimedi convenzionali e strategici*.

Università di Roma Tor Vergata
e-mail: rjappel@tin.it

Il ruolo delle dighe nella pianificazione delle risorse idriche e nella difesa dalle piene

1. Premessa

Due eventi relativamente recenti, l'uno climatico, l'altro strutturale o gestionale, rispettivamente in materia d'acque e d'energia, hanno posto in evidenza la fragilità o debolezza del sistema italiano sui due aspetti che riguardano, appunto, la provvista delle risorse idriche e la disponibilità di quelle energetiche.

I due eventi, letti come siccità e crisi energetica, hanno richiamato agli Autori un tema al quale circa 20 fa si dedicarono, con altri, per applicare a due diversi bacini idrografici – il Tagliamento in Friuli e il Crati in Calabria – alcune interessanti soluzioni in materia di pianificazione delle risorse idriche.

L'impostazione data allora al problema non fu sollecitata, naturalmente, da uno stato di crisi del sistema, quale gli eventi citati poc'anzi oggi potrebbero configurare. Essa nacque, stimolata da una consulenza, dal proposito di generalizzare l'adozione dei criteri che, in chiave difensiva in un caso e quasi esclusivamente idroelettrica in un altro, lo Stato e i produttori (privati) avevano adottato, rispettivamente, per la protezione del territorio dominato dal sistema Adige – Garda - Mincio e, specialmente nel dopoguerra, per la produzione d'energia pregiata. Un'impostazione che si potrebbe forse giudicare, oggi, come una sorta d'anticipazione di quella che la Legge 183 del 1989 avrebbe poi prospettato, in termini affatto generali, come Piano di bacino: a sua volta, un'eco, molto sfumata, del disegno che la Relazione De Marchi aveva tratteggiato nel 1970, ma con ben diversa struttura tecnica dello Stato, della materia idrografica nazionale.

Una visione dei modi d'operare in tema d'utilizzazioni idrauliche dunque non nuova, ma esplorata oggi con obiettivi diversi, e tra loro integrati, dall'obiettivo proprio dei produttori idroelettrici del nostro (passato?) tempo; ma con l'ossequio dovuto ai modelli dai quali fu tratta l'ispirazione: essenzialmente per la consuetudine che la nostra Scuola aveva, e tuttora ha, con i problemi idraulici dei bacini veneti e dei suoi impianti: una connotazione genetica ereditata da Paleocapa e da Turazza, con l'aggiunta d'una particella cromosomica a forma di diga.

2. Il modello concettuale

Il problema centrale di un qualsivoglia piano d'utilizzazione di un bacino è assai semplice, almeno nell'enunciato: la regolazione delle portate naturali rivolta a un loro specifico uso. La misura del quale, nel rapporto con il processo di regolazione, definisce l'architettura del sistema.

Gli elementi fondamentali di un sistema che si proponga, in una prospettiva integrata, il controllo delle risorse disponibili con l'obiettivo della difesa idraulica o dell'utilizzazione, oppure dell'una e dell'altra congiuntamente, sono anch'essi di facile definizione: serbatoi d'appropriata capacità distribuiti nel territorio, da un lato; canali o gallerie di collegamento, da un altro lato, ma immaginando anche possibili collegamenti estesi a territori e bacini idrografici diversi per vocazione idrologica e per misura delle risorse: una visione, dunque, non federalista, almeno in materia d'acque. E, a questo proposito, una lezione di Francesco Marzolo, verso la fine degli anni '40, ritorna nel ricordo a uno degli Autori (Datei, ovviamente, allora laureando) su uno speciale rapporto

¹in collaborazione con Luigi Da Deppo

allora esistente tra la SADE, veneta, e gli impianti della TERNI in Italia centrale. L'energia notturna prodotta dalla SADE, ma non collocata, veniva convogliata agli impianti del Vomano per pompare, con un impianto di sollevamento della potenza di 50.000 kW, le portate (fino a circa 15 m³/s) dalla centrale di Provvidenza (1030 m s.m.m.) al lago di Campotosto (a quota 1325,50 m s.m.m., realizzato nel periodo 1940-43 e completato nel 1950-51, con la capacità di 324·10⁶m³), ottenendo un'energia minore in quantità, ma di ben maggiore pregio. Un processo d'integrazione a grande distanza tra due sistemi idrografici a struttura climatica diversa, con rilevanti vantaggi in termini di rendimento.

Nella prospettiva delineata poc'anzi, non pare che si possa dubitare che la soluzione ai problemi che la siccità, quale che sia la ricorrenza del suo accadere o la sua causa, ma anche la difesa idraulica, e la produzione (non solo, e necessariamente, idroelettrica) pongono sia da ricercare con la creazione di serbatoi, dotati della massima capacità e disposti alla più alta quota possibile, talché la regolazione delle portate posseda cadenza pluriennale e la distribuzione possa raggiungere, per i collegamenti che possano realizzarsi tra le capacità, le contrade più lontane. Dunque, dighe e gallerie le opere necessarie per dare luogo al processo d'integrazione.

La determinazione della capacità del sistema e dei legami funzionali tra gli elementi che lo compongono è, com'è ben noto, una funzione di molte grandezze. Esse possono raggrupparsi in modo sintetico in due categorie: grandezze fisiche, ovviamente obiettive, le prime; grandezze legate a una scelta soggettiva di varia natura - economica, strategica, gestionale ecc. - le seconde.

La prima categoria. La misura delle risorse idriche disponibili e la storia climatica del bacino sotteso, da un lato; la struttura topografica, geometrica, geologica e geotecnica ancora del bacino - versanti e area d'imposta della diga - da un altro lato, danno modo d'inquadrare il problema in termini propriamente d'ingegneria nel senso, cioè, di definire l'ambito fisico entro il quale il problema possa trovare una sua possibile soluzione.

La seconda. Le prospettive d'utilizzazione delle capacità, dalla difesa idraulica per la laminazione delle piene all'uso potabile o irriguo o idroelettrico o, meglio, a un loro insieme, condizionano ovviamente, all'interno dell'ambito del possibile, la scelta progettuale attraverso un non difficile processo d'ottimizzazione: alla ricerca, sinteticamente, di quali capacità assegnare per la regolazione delle portate nella prospettiva d'una sua lunga esistenza; e di quale possa essere la gestione nel quadro dell'uso previsto multiplo, a regolazione annuale o pluriennale.

L'impostazione del processo d'ottimizzazione è strettamente legata, come la Storia dell'uso dell'acqua dimostra, alla cultura politica, economica e tecnologica del tempo nel quale il problema si pone: una non sempre facile funzione, da definire non tanto nel rapporto con l'immediato quanto con le proiezioni, spesso incerte, del futuro. Ma, oggi, con problemi diversi: per l'affermarsi di una cultura ambientalista presso la quale, com'è ben noto, la politica dei serbatoi - non infrequentemente il termine *diga* è riferito con accento dispregiativo - non è molto popolare. Non senza fondamento, naturalmente, specie per qualche evento, a misura tragica, che ha funestato la nostra Storia. Problemi, quelli ambientali, da considerare, dunque, con attenzione e interesse: che s'aggiungono a quelli produttivi e di difesa, irrimandabili, posti alla base dei piani.

Intorno alla scarsa popolarità della quale si diceva non mancano, naturalmente, anche contributi recenti; e, per qualche aspetto, stravaganti. Sostiene, infatti, Colin Ward (*Acqua e Comunità*; Eleutera, Milano, 2003): « *Lo spaventoso sconvolgimento di vite ed esistenze umane imposto da alcuni grandi progetti [le dighe] rende l'ingegneria idraulica di vasta scala tragica e insensata quanto una guerra, e il conto dell'acqua trasportata, dell'energia prodotta, della riduzione della penuria idrica o dell'eliminazione delle alluvioni a valle, è tanto scarso, e accompagnato dalla nascita di nuovi problemi, che non possiamo chiederci perché mai tanto dispotismo orientale moderno sogni di intraprendere queste opere, quando mille piccoli impianti locali sarebbero ben più*

redditizi. »: con la tentazione, irriverente, di pensare per questi mille impianti a potenze comparabili a quelle delle dinamo da bicicletta.

Il carattere pluriennale di un serbatoio trova nella funzione multipla che la sua regolazione dà modo di svolgere la sua più ampia giustificazione, quando possa realizzarsi, specie nella temuta prospettiva d'una mutata condizione climatica, un sistema integrato di collegamenti, esteso eventualmente ad altri bacini.

Gli impianti che dagli schemi proposti possono derivare appaiono, per le considerazioni svolte nella premessa, sempre più necessari; ma, fortunatamente, realizzabili con magisteri costruttivi di ben maggiore facilità rispetto al passato. Uno stato di necessità, questo, che nasce, per un verso, da una domanda d'acqua via via crescente; per un altro verso, dall'annotazione che i siti possibili per creare le notevoli capacità richieste (decine di milioni di m³) sono di sempre più difficile reperimento nelle aste dei corsi d'acqua principali. Talché la ricerca è da rivolgere a corsi d'acqua secondari che, pur con limitato bacino proprio, offrano però la possibilità di potere accogliere serbatoi d'elevata capacità, alimentati da portate (eventualmente modulate) provenienti, con gallerie o canali di gronda, dai bacini limitrofi.

Due considerazioni danno fondamento a quest'impostazione.

La prima: il notevole progresso segnato dalle conoscenze geologiche e dai procedimenti di costruzione delle gallerie. L'impiego delle frese a piena sezione (TBM) consente, infatti, avanzamenti e produzioni di scavo incomparabilmente maggiore del passato (a esplosivo): dai pochi metri al giorno agli attuali valori dell'ordine di 25÷30 m. E, in aggiunta, operando in sicurezza, con ben maggiore libertà nella scelta dei tracciati e sensibile riduzione delle eventuali finestre d'attacco

La seconda: la relativa sensibile riduzione dei costi di costruzione (riferiti al m³ d'acqua invasata) che l'incremento dell'invaso produce per il corrispondente incremento dell'altezza di ritenuta della diga e, quindi, del volume del materiale da porre in opera. Si osserva, infatti, che il volume d'invaso che una diga crea sbarrando una valle naturale cresce, per incrementi d'altezza, ben più rapidamente del volume della diga stessa: afflitta, invece, nei costi da spese fisse che, in un certo intorno dei valori dell'altezza stessa, sono circa costanti o ben poco dipendenti da essa ². In queste condizioni, la funzione che esprime il rapporto tra l'incremento di costo e l'incremento dell'invaso decresce rapidamente all'aumentare dell'altezza di ritenuta. Una riflessione, questa, solo geometrica; ma alla quale s'aggiungono poi i vantaggi della maggiore risorsa e della ben maggiore estensione del territorio altimetricamente dominato

I criteri che derivano da quest'impostazione sono stati applicati a due bacini. I risultati sono riferiti sinteticamente nelle seguenti note.

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Marittima e Geotecnica
dell'Università di Padova.
e-mail: luigi.dadeppo@unipd.it*

²Da Deppo, L. e Datei, C: Una nota sul rapporto tra costi e invasi in materia di dighe; L'ACQUA, n.3, 2003.

NW-IALAD: a European Network on up-to-date issues in dam engineering - Co-operation between industry, research institutes and authorities

The integrity and safety assessment of concrete dams plays an important role for the infrastructure of many states of the EU. However, the water reservoirs created by those dams are often considered as a potential hazard to the population. The safety of these important structures is of great concern to the owners, operators and engineers as well as to the public.

This is the motivation to establish a thematic network, which brings together government authorities, researchers from universities and end users from companies to conduct a state of the art review on the integrity and safety assessment practice for concrete dams. The aims of the network are:

- to compare and critically review the current practice of dam operation, maintenance, rehabilitation and of dam safety assessment in different European countries in order to foster synergies;
- to conduct a systematic comparison of available models for the numerical simulation of the structural behaviour of concrete dams (benchmarking), and,
- based on the results of the state of the art review, to point out possible shortcomings and needs for improvement and to develop further plans and strategies apt to enhance the current practice.

The thematic network NW-IALAD (Integrity Assessment of Large Concrete Dams) responds to the specific EU programme promoting competitive and sustainable growth. The key action is titled KA1 - Innovative Products, Processes and Organisation. The target research action is TRA 1.9 "Infrastructure: Safe and Cost Effective Civil Infrastructures".

The project outcomes will mainly reflect the state of the art in concrete dam issues in Europe.

The generated data basis and comparison of the benchmark examples will give a wide view on dam related problems encountered mainly in the European environment. Suggestions and recommendations on a general practice will be made. Shortcomings and prevailing deficits will be pointed out. These will form the basis for future research work and measures to be taken.

The results of the NW-IALAD outcome can be differentiated into several topics:

- *Dam operation, maintenance, repair and incidents:*
Different philosophies are used by the dam operators. The availability of successful examples for dam operation, maintenance and repair measures outside the own organisation can help with the assessment of present situations and help to avoid mistakes. Documented incidents are a valuable resource for enlarging the experience in dam engineering.
- *Dam surveillance and dam performance:*
According to the hazard potential of dams minimum requirements for the dam surveillance need to be met. Monitoring and interpretation of the measurement results must give reliable and sufficient information to assess the present state of a dam. Alarm procedures if necessary need to be initiated within the shortest possible time when unexpected dam behaviour is encountered.
- *Numerical tools for the simulation of concrete dams under several load conditions:*
The requirement of these tools is their practicability for the use in dam engineering. As numerical simulations of dam behaviour are carried out within the constraints of limited available time and limited financial resources the available tools need to be

easy to handle and reproduce as closely as possible what is happening in the prototype. Requirements that have to be met in dam engineering primarily are the ability to simulate non-linear material behaviour, joints, fracture and damage processes and all this in combination with the presence of pressurized water.

- *Rock mechanics for the simulation of the foundation:*

The behaviour of the foundation preferably should be able to be simulated with the same tools as used for the simulation of the dam concrete. A reliable method to determine the material parameters is required.

- *Dam safety and integrity assessment:*

For the safety and integrity assessment the availability of qualified and trained personnel at all levels is a requirement. The practice in various countries is different – minimum requirements need to be met. Different risk assessment procedures and philosophies are used. A possible introduction of new approaches that can be helpful for the assessment and the applicability for dam engineering needs to be discussed.

At present NW-IALAD has 31 members from industry, research and government authorities from all over Europe and numerous passive users who also participate in the network. The main contractors are CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano - Giacinto Motta SpA) - *Italy*, Electricité de France - *France*, National Technical University of Athens - *Greece*, Politecnico di Milano - *Italy*, Università degli Studi di Padova - *Italy*, Universitat Politècnica de Catalunya - *Spain*, University of Innsbruck - *Austria*, University of Wales Cardiff - *United Kingdom* and Verbund - *Austria* (Project co-ordinator).

Verbund-AHP, Wien - Austria
e-mail: Raimund.Gaisbauer@verbund.at

La simulazione numerica del comportamento strutturale delle dighe: successi e crisi dell'approccio deterministico - critica dei presenti approcci alternativi

Si illustrano sinteticamente i successi dei modelli matematico-numeriche di tipo deterministico nel simulare fedelmente il comportamento 'macroscopico' delle dighe in calcestruzzo sotto l'azione dei carichi esterni in condizioni di esercizio normale, rimarcando tuttavia che le variabili locali (ad es. il tensore delle dilatazioni unitarie o quello delle tensioni) spesso non vengono simulate dai modelli correnti con altrettanta fedeltà delle variabili 'integrali' (ad esempio gli spostamenti). I modelli deterministici in parola (accanto a modelli basati su analisi statistiche del comportamento passato che non vengono qui considerati) sono spesso assunti a base del controllo del rischio strutturale. Si sviluppano considerazioni critiche su codesti metodi di controllo del rischio strutturale, la cui idea di base consiste nell'effettuare un confronto pressoché continuo tra le previsioni delle risposte strutturali 'macroscopiche' (o 'integrali': ad esempio gli spostamenti), fornite dal modello deterministico, e le corrispondenti misure delle risposte effettive, facendo poi seguire un giudizio di accettabilità o meno dell'entità e degli andamenti degli inevitabili scarti tra previsioni e misure (i più comunemente usati requisiti di accettabilità potendo essere compendati nell'essere la distribuzione degli scarti di natura casuale e la loro entità sufficientemente piccola). Si illustra in seguito come la progressiva riduzione dei margini di resistenza verificatasi nell'evo moderno a causa dell'aumento delle dimensioni e di fattori economici (aumento esponenziale del costo dei materiali e della mano d'opera), accanto al riconoscimento della natura statistica delle possibili azioni esterne, abbia messo in crisi il classico concetto deterministico di 'fattore di sicurezza' conducendo all'adozione del concetto probabilistico/affidabilistico di 'probabilità di cedimento', quantità che tuttavia ad una analisi critica rigorosa mostra non solo alcuni punti deboli dei metodi adottati per stimarla, ma rivela un contenuto semantico sfuggente e lontano da una interpretazione univoca, sia oggettiva che intuitiva.

Si illustrano i risultati, complessivamente non conclusivi, di tentativi recenti di estrapolare al futuro l'andamento delle serie cronologiche degli scarti tra previsioni e misure, nella speranza di individuare graficamente (con metodologie mutuata dalla dinamica dei sistemi complessi) 'firme' caratteristiche del tipo di evoluzione probabile e quindi un'eventuale tendenza della struttura a portarsi verso situazioni di pericolo.

Si mostra in conclusione come i metodi sinora impiegati per il controllo del rischio strutturale, sia 'a priori' tramite metodi probabilistici che 'a posteriori' o tramite monitoraggio continuo basato su modelli deterministici e sull'analisi degli scarti previsioni/misure, possano essere sottoposti a critica da un punto di vista di rigore scientifico. Beninteso tali critiche non pregiudicano l'utilità pratica di tali strumenti ai fini sia di orientare il controllo operativo dello stato di salute delle dighe esistenti, sia di stimare a priori, sempre in via orientativa, il grado di rischio di dighe in fase di progetto, o infine di classificare in via comparativa una serie di dighe in esercizio, mettendole in ordine di rischio allo scopo di pianificare programmi di controllo più o meno intensi od eventualmente interventi correttivi.

Si tenta infine di immaginare secondo quali linee si potrebbero impostare ricerche per superare tali critiche, ad esempio individuando funzioni 'ottimali' delle variabili misurabili per le quali una particolare analisi degli scarti tra previsioni e misure possa rivelare le componenti di ipotetici 'modi di collasso' eventualmente presenti nelle funzioni anzidette. Se un simile approccio, od altri analogamente 'ottimizzati' potessero essere realizzati, da una parte il progetto delle installazioni di misura verrebbe sottratto alla presente empiria, definendo criteri oggettivi per la scelta dei punti di misura e delle

variabili da monitorare, dall'altra si conseguirebbero anche criteri razionali per il controllo del rischio strutturale, conciliando in un approccio rispondente al requisito di 'oggettività galileiana' gli aspetti migliori degli approcci deterministico e probabilistico nonché tenendo conto dei probabili ulteriori progressi nelle tecniche di misura diretta delle risposte della struttura alle variazioni delle azioni esterne.

Enel-CRIS
e-mail: michele.fanelli@infinito.it

Le potenzialità della modellazione numerica nell'analisi del comportamento e nella valutazione della sicurezza delle dighe

La valutazione della sicurezza delle dighe, in particolare per quelle esistenti, si configura come un processo di notevole complessità al quale concorrono una serie di attività eterogenee che devono essere integrate razionalmente.

In tale processo trova sempre più spazio la modellazione matematica – intendendo con tale terminologia l'uso di procedure numeriche e algoritmi implementati in programmi di calcolo – in quanto gli ingegneri delle dighe ricorrono ormai frequentemente all'uso di programmi di analisi strutturale sia per le scelte progettuali (di nuove opere o per la verifica di importanti interventi di ripristino), sia per l'interpretazione del comportamento osservato delle opere esistenti, sia infine per le verifiche di sicurezza.

I modelli matematici, dopo il notevole successo acquisito da alcuni decenni in vari campi dell'ingegneria (aeronautica, meccanica, civile, ecc.), stanno assumendo da alcuni anni un ruolo significativo anche nel settore delle dighe, con il superamento del *gap* esistente tra gli specialisti di settore e i progettisti/gestori delle dighe. Questi ultimi sono, in genere, indotti a ricorrere a metodi di calcolo tradizionali e a considerazioni empiriche sia perché possono fare riferimento ad esperienze consolidate, sia per i condizionamenti derivanti dalle limitazioni imposte dalla normativa vigente, peraltro datata in diverse sue parti.

La riduzione del *gap* sopra citato è stata conseguita anche grazie alla sempre maggiore divulgazione delle conoscenze delle potenzialità dei modelli matematici, al sempre più diffuso utilizzo dei calcolatori, all'inserimento della modellazione matematica in numerose raccomandazioni e normative internazionali, all'organizzazione di seminari/conferenze in cui sono state coinvolte tanto la cultura dei progettisti/gestori, quanto quella degli specialisti di modellazione matematica.

Nel rapporto vengono dapprima sintetizzati gli aspetti più significativi del ruolo, dei limiti e delle potenzialità che la modellazione numerica gioca nelle varie fasi di vita e per le varie problematiche che interessano le dighe.

Successivamente vengono riportati i concetti informativi sviluppati nei bollettini ICOLD (la Commissione Internazionale delle Grandi Dighe) n. 94 e n. 122 sulla *validazione, giustificazione, affidabilità e applicabilità* della modellazione numerica. Inoltre, vengono sintetizzati i risultati più significativi dei 7 *Benchmark-Workshops* sui metodi di calcolo delle dighe svolti tra il 1991 e il 2003 nell'ambito del Comitato Tecnico ICOLD sui Metodi di Calcolo per l'Analisi delle dighe.

Infine vengono riportate alcuni risultati di applicazioni relative a dighe esistenti in calcestruzzo, in cui sono state affrontate, con l'ausilio della modellazione numerica, alcune problematiche particolarmente complesse:

- individuazione degli effetti prodotti da un movimento di versante sul comportamento di una grande diga a volta, determinazione dello stato tensionale e deformativo presente nell'opera, previsione del comportamento futuro;
- valutazione dello stato tensionale e deformativo indotto dallo sviluppo del calore di idratazione e dal successivo raffreddamento in fase di presa e indurimento del calcestruzzo in una grande diga muraria;
- valutazione della resistenza ultima di una diga a gravità arcuata nei riguardi del meccanismo di scorrimento.

La sicurezza della dighe in un'ottica multidisciplinare

L'ingegneria strutturale delle grandi opere, quali le dighe, ha storicamente seguito un percorso affine alla maggioranza delle discipline scientifico-applicative. Si è mossa, infatti, da una conoscenza approssimata ma basata su pochi ed essenziali fondamenti concettuali, alla teorizzazione di tali concetti, alla rappresentazione numerica degli stessi ed infine all'approfondimento specialistico dell'opera nei suoi numerosi dettagli.

Se è vero che l'ingegneria delle dighe nel mondo mostra ancora una forte componente progettuale di nuove opere, la situazione italiana è essenzialmente rivolta alla conservazione del parco esistente. Tale specifica esigenza ha dato un ulteriore spunto all'analisi della diga in termini diagnostici per il quale scopo è naturale introdurre un'ottica multidisciplinare, poichè il problema è di tipo inverso.

Risalire dagli effetti alle cause conduce ad un percorso, ben diverso da quello progettuale, per il quale è oggettivamente necessaria una ridondanza di informazioni e dati. La sfida con cui confrontarsi è oggi rivolta sia allo sviluppo di metodi e di tecniche diagnostiche ad accresciuta efficacia ed affidabilità, sia a saperne trarre una sintesi omogenea e fruibile.

Occorre in un certo senso risalire alla rigorosa semplicità del *modus operandi* classico; così come la conoscenza dell'ingegnere-architetto del passato era fondata sulla maestria del gestire il combinarsi di due comportamenti fondamentali, mensola ed arco, anche l'odierno ingegnere-diagnostico deve saper armonizzare e sintetizzare le molteplici evidenze di cui si trova a disporre.

“Solita fatalità dei lavori fatti a cottimo”: così lo storico Targioni Tozzetti liquidava, ancora nel 1770, il crollo di una diga avvenuto nella Repubblica Senese alla fine del 1400. L'indiscutibile progresso nella sensibilità civile ed ambientale non hanno evitato tragedie relativamente recenti, per lo più dovute ad un'errata valutazione di sintomi registrati e perduranti. Ancora troppo spesso si ricorre ad una forma di sintesi basata sul trascurare o sullo sminuire alcune o molte delle argomentazioni disponibili. Un quadro contraddittorio e non univoco viene risolto eliminando i fattori scomodi. Ne deriva una frequente separazione tra classi di esperti: gli sperimentali contrapposti ai teorici, i numerici agli analitici e così via, in un processo che va successivamente propagandosi anche all'interno di una stessa famiglia metodologica.

Un notevole supporto all'armonizzazione ed alla sintesi delle informazioni, salvaguardandone tuttavia la diversità e la numerosità, viene offerto dall'informatizzazione del processo nel suo assieme. Ciò è largamente sperimentato nell'acquisire e nel visualizzare dati mediante sensori residenti sulla struttura, nell'effettuarne le relative analisi, nell'adattare il modello numerico mediante identificazione e così via. Ma è possibile soprattutto gestire ed aggiornare le diverse fonti di giudizio rispetto ad opportune soglie di ammissibilità, mediante processi di aggregazione bayesiana. Si realizza in tal modo un vero e proprio cruscotto di controllo della diga, a supporto delle valutazioni di sicurezza e della gestione di scadenze ispettive e manutentive.

In questo modo è possibile passare da un'ottica manutentiva a cadenza temporale prestabilita, od in risposta ad un evento indesiderato, ad un approccio adattativo nel quale le condizioni di sicurezza vengono successivamente stimate in base allo stato dell'opera. Nel corso della presentazione verranno sviluppati alcuni degli spunti citati, basandosi anche su alcune recenti esperienze nel settore.

*RSI Sistemi - Gruppo Altran, Milano
e-mail: luca.bolognini@rsisistemi.it*

Le nuove sfide nell'ingegneria delle dighe: la reazione alcali-aggregato e l'analisi dinamica

La società moderna non può più tollerare perdite umane dovute ad incidenti evitabili. Per gli ingegneri delle dighe questi potenziali incidenti sono sempre cedimenti strutturali (e quindi parziale/totale collasso) causati o dal degrado del calcestruzzo (reazione alcali-aggregato) o da terremoti. Fino a tempi abbastanza recenti tendevamo a limitare i nostri metodi analitici di previsione a tipi abbastanza semplicistici, a causa di ignoranza tecnica e di una maggiore tolleranza nei confronti dei disastri (a volte al limite dell'irresponsabilità). Oggi, con migliori tecniche di indagine, una maggiore sensibilità e la possibilità di comunicazioni istantanee, non possiamo più permetterci di seguire lo stesso paradigma, ma dobbiamo fornire alla società le nostre migliori soluzioni tecniche. La società di ritorno deve accettare il fatto di dare maggiore importanza (per esempio fiducia e risorse finanziarie) all'analisi avanzata e accettare i nostri risultati.

Un'altra sfida che la comunità delle dighe deve affrontare è l'allargarsi del divario fra lo stato dell'arte e lo stato della pratica. Troppo spesso un costoso intervento di ripristino è eseguito in base ad analisi semplicistiche. Gli ingegneri professionisti non devono essere spaventati dall'investire maggiori risorse in un'analisi avanzata, che potrebbe significativamente ridurre il costo finale dell'intervento di ripristino.

La reazione alcali-aggregato, o l'osteoporosi del calcestruzzo, è una malattia perniciosa il cui tempo di incubazione può essere molto lungo e che non può ancora avvalersi di nessun trattamento. Quindi la nostra attenzione è limitata a monitorare la diga e ad anticipare possibili disastrosi effetti collaterali attraverso predizioni numeriche. Purtroppo lo stato della pratica si limita allo sviluppo di modelli piuttosto semplicistici con la sola soddisfazione che essi possono far coincidere i loro valori con quelli reali dei passati spostamenti del coronamento. Comunque, non ci si rende conto che praticamente ogni modello può essere finemente calibrato per raggiungere questo risultato e che quello che è di maggior interesse è il campo degli sforzi (derivata degli spostamenti) piuttosto che gli spostamenti stessi. Purtroppo molto raramente gli sforzi sono misurati *in situ* (sebbene sia possibile farlo utilizzando i misuratori di sforzi comunemente impiegati in geologia nelle prove di meccanica delle rocce). Di conseguenza un modello non ha un reale valore a meno che non sia solidamente fondato sulla chimica, la fisica e la meccanica.

Nell'esposizione sarà presentato un nuovo modello sviluppato dall'autore. In questo modello la cinetica della reazione è considerata per esprimere l'espansione volumetrica attraverso una sigmoide caratterizzata da due parametri temporali. Questi sono una funzione della temperatura, poiché l'AAR è una reazione attivata termodinamicamente che può essere governata dalla legge di Arrhenius. Il calcestruzzo presenta un degrado dipendente dal tempo del modulo elastico e della resistenza a trazione, come recentemente si è potuto osservare in alcuni test di laboratorio. Inoltre il gel proveniente dall'AAR si può diffondere nelle micro e macro fessure con una limitata espansione. Il calcestruzzo stesso è modellizzato attraverso un continuo non lineare con un modello plastico a compressione e un modello a fessurazione in trazione. Infine la diga viene modellizzata con elementi di interfaccia fra calcestruzzo e roccia e lungo le principali fessure strutturali (esistenti o potenziali). I risultati preliminari saranno presentati per la prima volta.

I recenti terremoti in Italia, per non menzionare quello in Iran, hanno anche scosso (alcuni) convincimenti sulla nostra capacità di anticipare i danni indotti dai terremoti nelle dighe. Contrariamente alle dighe affette da AAR, quelle soggette a potenziali forti sollecitazioni possono essere adeguatamente progettate per resistere ai sussulti di madre

natura senza seri danni. La sfida consiste nel fatto che l'analisi superficiale dinamica delle dighe è relativamente semplice. Comunque questa porta sempre a tensioni elevate inaccettabili, e a questo punto entra in gioco una valutazione ingegneristica soggettiva per decidere sulla sicurezza della diga.

La causalità di questa decisione, spesso presa senza solide basi, deve essere sostituita da un'analisi dettagliata e sofisticata. Tale analisi dinamica della diga deve considerare l'interazione fluido- struttura, la variazione della sottopressione nelle fessure durante la dilatazione e il restringimento, l'interazione roccia-fondazione, la dissipazione di onde elastiche nella fondazione attraverso il cosiddetto "smorzamento dell'irradiazione", la non linearità del calcestruzzo, lo stato iniziale di sforzo della diga (temperatura e sforzi indotti dalle fasi costruttive). Tutti questi dati devono essere compresi in un solido codice ad elementi finiti con capacità dimostrate, provate e convalidate. L'esposizione mostrerà indagini recenti di alcune dighe.

In entrambe le analisi la complessità dell'interazione fra ingegneria e codici numerici è tale che viene posta una grande enfasi nel facilitare l'input dell'utente e la visualizzazione grafica dei risultati. Questo aspetto spesso trascurato dell'interazione uomo-macchina è essenziale per metterci in grado di condurre analisi complesse, purchè non venga oscurata la profondità dell'analisi stessa. In verità un esagerato affidamento sui codici di calcolo è molto pericoloso e dovrebbe sempre essere confermato dal comune senso ingegneristico.

Le dighe hanno storicamente fornito alla comunità scientifica quesiti stimolanti sui quali sperimentare nuovi metodi. Una delle prime applicazioni del metodo delle differenze finite è relativa all'analisi di una diga e la prima applicazione degli elementi finiti riguarda una diga fessurata. Sta a noi oggi accettare questa eredità e il compito di proporre non solo problemi ma metodi innovativi da estendere in altri campi.

*Politecnico di Milano - University of Colorado, Boulder
e-mail: saouma@bechtel.colorado.edu*

Analisi inverse per caratterizzazione di materiali e diagnosi di danni nelle dighe

Premessa

Questo Convegno è connesso in vari modi ad un progetto di ricerca interuniversitaria coordinata e ne rappresenta, in un certo senso, ambito coronamento. Il progetto, cofinanziato per tre tornate dal MIUR, è limitato a problemi meccanico-strutturali delle dighe in calcestruzzo, ma è aperto sia a problematiche scientifiche generali purché pertinenti, sia a collaborazioni interdisciplinari e ad interazioni con ricercatori dell'industria e con progettisti. Ne sono testimonianza, oltre al presente convegno, tre giornate di studio a larga partecipazione non accademica tenutosi a Milano due anni or sono, e la attiva presenza di due delle sette unità di ricerca nell' "European Network" IALAD.

Le quattro comunicazioni in sequenza a questo Convegno da parte di docenti attivi nel progetto MIUR intendono essere soltanto esemplificative dei risultati finora ottenuti con le ricerche co-finanziate. Una panoramica più ampia del lavoro svolto si può cogliere dall'elenco di pubblicazioni a disposizione dei partecipanti a questo Convegno.

Analisi inverse per modelli di frattura del calcestruzzo e di giunti

Il termine analisi inversa, sempre più spesso ricorrente in meccanica applicata, richiama l'uso di informazioni concernenti gli effetti al fine di cogliere proprietà delle cause. Quando gli aspetti da valutare sono quantificabili con parametri, la loro identificazione è riconducibile alla minimizzazione rispetto a questi di una opportuna norma del divario fra quantità misurate (nella risposta del sistema alle azioni esterne) e corrispondenti calcolate mediante modello matematico del sistema in funzione di questi parametri.

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo, in dighe esistenti o per dighe in progettazione, richiedono di essere studiate con tecniche sperimentali ad hoc (anche in virtù delle dimensioni degli aggregati spesso notevolmente maggiori delle usuali nel calcestruzzo). Per la caratterizzazione e calibrazione del comportamento a frattura, particolarmente adatte risultano le prove a cuneo ("wedge splitting tests"), anche perché suscettibili di essere agevolmente estese a frattura idraulica e a frattura dinamica anche in presenza di stati di sollecitazione pluriassiale.

Sulla base di dati sperimentali ottenuti con tali prove a Losanna da V. Saouma e collaboratori, è stato sviluppato, implementato e validato numericamente un procedimento per la identificazione dei parametri che definiscono quantitativamente un "modello coesivo" di frattura quasi-fragile in "modo I", con tratto discendente ("softening") bilineare come suggerito da una Commissione RILEM. Il metodo adottato è il filtro di Kalman-Bucy esteso: metodo sequenziale (cioè con il miglioramento delle stime all'aumentare del numero di informazioni sperimentali utilizzate), bayesiano (con inizializzazione da "esperto"), stocastico (atto a quantificare l'incertezza delle stime che consegue agli errori sperimentali, definiti da covarianze nell'ipotesi di distribuzione gaussiana).

Nello studio sull'identificazione dei parametri qui delineato (dettagli in G. Bolzon, R. Fedele, G. Maier, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 191, pp. 2947-2971, 2002) gli aspetti che si ritengono innovativi sono la rappresentazione matematica del modello coesivo adottato come problema di complementarità lineare; le modalità computazionalmente economiche del ricorrente calcolo delle matrici di

sensibilità; un provvedimento (tuttora da approfondire nei suoi aspetti teorici) inteso al riconoscimento e all'attenuazione degli errori di modello.

Modelli di interfaccia come problemi di complementarità sono stati formulati per "modo misto", ed applicati anche in presenza di infiltrazioni d'acqua (dettagli in G. Cocchetti, G. Maier, X. Shen, *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, Vol. 3. n. 3, pp. 279-298, 2002; G. Bolzon, G. Cocchetti, *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 27, pp. 353-378, 2003).

Attualmente è in corso nel nostro Laboratorio una estesa sperimentazione sulle interfacce tra getti di calcestruzzo, al fine di caratterizzare il comportamento di giunti artificiali e fessure. Questo studio (affidente alla tesi di dottorato di E. Puntel) concerne la modellazione del comportamento ciclico di interfacce adesive e scabre, che rappresenta la principale causa di non linearità della risposta a carichi gravosi statici e sismici. Tale modello sarà calibrato mediante simulazione ed analisi inversa sui risultati delle prove di laboratorio.

Analisi diagnostiche di dighe in calcestruzzo

Una categoria di analisi inverse di crescente importanza tecnico-scientifica ed economica-sociale nell'ingegneria delle dighe è costituita dalle diagnosi di possibili danni dovuti a degrado chimico-fisico del calcestruzzo (in particolare per "reazione alcali-aggregato", AAR) e/o a situazioni di carichi eccezionali (in primis sismiche).

Le analisi diagnostiche "globali" di dighe in calcestruzzo si basano su dati sperimentali forniti dai tradizionali strumenti di monitoraggio, quali accelerometri per prove dinamiche, pendoli e collimatori per prove statiche. La metodologia diagnostica attualmente studiata a Milano presenta i caratteri salienti che seguono: l'azione esterna è statica, prodotta da variazioni del livello di invaso del bacino; la strumentazione in situ include dispositivi radar attualmente disponibili per diffuse e molteplici misure di spostamento; i parametri da identificare sono locali moduli elastici, rappresentativi del degrado prodotto per decenni nel calcestruzzo da AAR, degrado che riduce sia rigidità che resistenza in modo correlato; l'analisi inversa, previa modellazione per elementi finiti, è svolta con approccio deterministico ai minimi quadrati ed è corroborata da analisi di sensibilità (delle quantità misurate rispetto ai parametri cercati) e da valutazioni di vari algoritmi attualmente disponibili in tema di programmazione matematica non lineare e non convessa.

Dallo studio appaiono emergere cospicui vantaggi pratici dell'ulteriore sviluppo di sistemi di monitoraggio statico con radar e di procedimenti di analisi inversa opportunamente selezionati ed implementati in programmi di calcolo ad hoc, adatti pure a calcoli di sensibilità per la progettazione del processo identificativo numerico e sperimentale. I risultati di questa ricerca sono stati finora presentati a congresso internazionale (R. Ardito, P. Bartolotta, L. Ceriani, G. Maier, Proc. 5th Euromech Solid Mechanics Conference, Salonicco, 2003), nel sito web del Network IALAD e in lavori in preparazione.

Attualmente è allo studio nell'Unità di Ricerca una tecnica per diagnosi locale che appare nuova nell'ingegneria delle dighe, anche se presenta analogie con un procedimento proposto anni fa a fini geotecnici (cfr. G. Gioda, G. Maier, *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 15, n. 12, pp. 1823-1848, 1980). Si tratta del procedimento seguente: un foro profondo viene praticato come per carotaggio non invasivo e pressurizzato a vari stadi di avanzamento; si misurano le variazioni di diametro del foro che rappresentano i dati da abbinare a simulazioni per elementi finiti per l'identificazione di parametri concernenti proprietà del calcestruzzo, anche a frattura, e possibili stati tensionali dovuti ad AAR.

I problemi delineati in questa comunicazione sono attualmente affrontati a Milano da B. Miller (visitatore polacco), R. Ardito e R. Fedele, con approccio “soft computing” alle reti neurali artificiali, un approccio che può risultare vantaggioso quando i dati sperimentali sono relativamente scarsi.

A conclusione, si può affermare che anche nell'ingegneria delle dighe vanno diffondendosi, con benefici effetti, analisi inverse in cui confluiscono meccanica sperimentale, meccanica strutturale e tecniche computazionali.

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano
e-mail: giulio.maier@polimi.it*

Modelli multifase per l'ingegneria delle dighe

Nel progetto di ricerca la teoria dei mezzi porosi multifase è utilizzata per analizzare il comportamento meccanico delle dighe a gravità di calcestruzzo. I risultati della ricerca possono essere applicati sia in fase progettuale, per la costruzione di nuove opere, sia per comprendere le cause dei fenomeni di degrado strutturale riscontrati in diverse dighe costruite alcuni decenni orsono e programmare interventi per il ripristino o per l'aumento delle sicurezze delle stesse.

Nella formulazione multifase adottata il calcestruzzo è descritto dal punto di vista meccanico come un sistema composto da una matrice porosa e una o più fasi liquide che la permeano ed è sottoposto a un campo termico. Si assume che la fase solida abbia proprietà visco-elasto-plastiche e possa manifestare fessurazioni con distribuzione discreta. Il comportamento dell'insieme è il risultato dell'interazione di ogni fase con le altre. Il modello è in grado di rappresentare situazioni diverse della matrice porosa, dalla completa saturazione alla quasi totale assenza di fluido. Il sistema di equazioni che regge il problema siffatto consiste nelle equazioni di bilancio di massa, della quantità di moto, del momento della quantità di moto, dell'energia e delle appropriate equazioni costitutive. Le equazioni di bilancio macroscopiche sono ottenute dall'equazioni scritte a livello microscopico utilizzando degli operatori di media spaziale, con un'estensione della formulazione di trasferimento di massa e calore di Whitaker al caso di mezzi porosi deformabili [Lewis, Schrefler; 1998; *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*; pp.: 508; John Wiley and Sons.].

Le soluzioni in forma chiusa sono limitate a poche applicazioni e per i casi di interesse ingegneristico è necessario ricorrere a soluzioni numeriche. A tale scopo, nell'ambito del progetto, è stato messo a punto un codice di calcolo che considera l'intera complessità del fenomeno fisico. Le condizioni al contorno possono essere del primo tipo (imposizione sul contorno dei valori della pressione, degli spostamenti e della temperatura) o del secondo tipo (imposizione di flussi e di forze di superfici). Le equazioni di bilancio macroscopiche, dopo l'introduzione delle equazioni costitutive sono risolte nel dominio spaziale con il metodo degli elementi finiti e nel dominio temporale con il metodo delle differenze finite. Le variabili di base sono la pressione del fluido, la temperatura e il campo di spostamento. Tali quantità possono essere direttamente confrontate con dati acquisibili da sistemi di monitoraggio in sito.

Il dominio spaziale è discretizzato in elementi finiti con un algoritmo adattivo che assicura una corretta descrizione delle variabili di campo, della loro evoluzione temporale e delle quantità ad esse correlate (flussi, tensioni e velocità) [Secchi S. & Simoni L., *An improved procedure for 2-d unstructured Delaunay mesh generation*, *Advances in Engineering Software incorporating Computing Systems in Engineering*, **34** (4), 217-234, 2003]. La frattura è descritta con un modello coesivo di rottura quasi fragile che prevede la formazione di una zona di processo all'apice, dove i lembi aperti della fessura si scambiano forze coesive di richiusura di intensità dipendente dalla distanza tra i lembi stessi. La formazione, la direzione di propagazione, e quindi il percorso della frattura, non sono fissati a priori ma costituiscono parte dei risultati dell'analisi.

Il moto del fluido nella frattura e la distribuzione di pressione dipendono, oltre che dall'altezza piezometrica, dalle permeabilità del calcestruzzo e della frattura stessa. In corrispondenza della zona d'apice, dipendentemente dalla velocità di propagazione della frattura, possono realizzarsi pressioni negative (depressioni) note come fluid-lag. Mentre nelle formulazioni analitiche presenti in bibliografia [Boone, T.J., Ingraffea, A.R.; 1990; A

³in collaborazione con S. Secchi e L. Simoni

numerical procedure for simulation of hydraulically-driven fracture propagation in poroelastic media; International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 12, pp. 27-47, Carter et al. – 2000] questo fenomeno è conseguenza di assunzioni sulla velocità di propagazione del fluido e sulla velocità di propagazione della fessura, nel modello che viene presentato è un risultato dell'analisi dell'interazione tra i vari campi. La presenza di pressioni negative influenza lo stato di tensione nella matrice solida e quindi il fenomeno di propagazione della frattura stessa.

Attualmente è in via di realizzazione un'estensione della formulazione matematica e numerica per l'analisi degli effetti delle reazioni "alcali-aggregato". Si tratta di reazioni chimiche che sono additate come una delle principali cause del degrado strutturale riscontrato in numerose dighe costruite con getti massivi di calcestruzzo. Le reazioni alterano le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo e provocano una coazione nella matrice solida con conseguente formazione di stati tensionali rilevanti e apertura/propagazione di fessure. Le reazioni "alcali-aggregato" sono condizionate dall'umidità del calcestruzzo, dalla temperatura e dallo stato di compressione, oltre che dalla composizione del calcestruzzo. Con l'avvertenza di introdurre opportune relazioni costitutive fenomenologiche che, in funzione delle variabili di base, esprimano l'effetto dei processi chimici di formazioni degli alcali, il modello multifase si presenta come l'ambiente naturale per lo studio di questi fenomeni degenerativi.

La modellazione degli effetti strutturali della reazione "alcali-aggregato" nel modello numerico multifase e nel relativo codice di calcolo è ottenuta con l'introduzione di uno stato di coazione nella matrice solida, funzione della pressione, della temperatura e dello stato tensionale.

Università di Padova
e-mail: bas@caronte.dic.unipd.it

Problemi di meccanica della frattura delle dighe

1. Premessa

Il comportamento meccanico delle strutture fessurate in calcestruzzo è strettamente legato a quello della *zona di processo*, dove il materiale, sebbene danneggiato, è ancora in grado di trasmettere delle tensioni. Il comportamento di questa zona, che si sviluppa all'apice della fessura macroscopica, a sua volta dipende dalla interazione delle microfessure tra loro, con gli aggregati e con le porosità del materiale. Scopo della *meccanica della frattura* è quello di spiegare questi fenomeni sulla base di ben definiti principi fisici, al fine di ottenere *oggettività* sia nella previsione del comportamento in condizioni eccezionali, sia nella interpretazione dei dati derivanti dal monitoraggio. Nella preparazione dei calcestruzzi per le dighe si usano aggregati di dimensioni notevolmente maggiori rispetto a quelli usati per le più diffuse costruzioni edili ed industriali. Questo fatto comporta che la lunghezza della zona di processo *non sia trascurabile* rispetto alle dimensioni strutturali e debbano quindi essere usati i metodi della meccanica della frattura *non-lineare*. In particolare, i lavori che seguono hanno riguardato la simulazione numerica del comportamento meccanico della zona di processo. In questi lavori essa è rappresentata come un *prolungamento fittizio* della fessura reale (libera da tensioni) dove le trazioni sono funzioni decrescenti della discontinuità di spostamento (incrudimento negativo o *softening*). Tale modello viene chiamato modello della *fessura fittizia o coesiva*. Elemento comune a tutti i lavori presentati nel seguito è quello di assumere che, in condizioni di carico monotone ed in assenza di attrito, l'energia dissipata durante la crescita della fessura sia una proprietà del materiale, chiamata energia di frattura. Questa assunzione è sufficiente a spiegare i principali *effetti scala*, cioè quelle evidenze sperimentali che si manifestano quando si confrontano le curve di risposta meccanica ottenute da due prove di frattura condotte con gli stessi rapporti geometrici e variando solamente le dimensioni strutturali.

2. La propagazione subcritica della fessura sotto carichi di lunga durata

La sicurezza delle dighe fessurate in calcestruzzo è strettamente legata al comportamento meccanico sotto carichi di lunga durata: è noto infatti che, in tali condizioni, può verificarsi la propagazione della fessura anche per carichi inferiori a quelli necessari in condizioni monotone. Questo fenomeno prende il nome di *propagazione subcritica*. Considerando il calcestruzzo come un materiale composito costituito da inerti immersi in una matrice, si può osservare come quest'ultima, nella zona di processo, sia sottoposta ad elevate tensioni di trazione. Carichi sostenuti nel tempo inducono nella matrice fenomeni di tipo viscoso che portano alla crescita delle micro-fessure e quindi alla riduzione della capacità di trasmissione degli sforzi. Come modello di interazione tra viscosità e micro-fessurazione è stato assunto quello proposto da Santhikumar e Karihaloo [1], che a sua volta si basa sul modello micro-meccanico per la zona di processo di Huang-Li [2]. In un generico punto della zona di processo il percorso delle tensioni in funzione della discontinuità di spostamento non è definito a priori ma dipende dall'evolversi del suddetto fenomeno di interazione. Il processo di analisi prevede una prima fase a carico crescente, in cui non sono attesi scarichi locali ma solo una progressiva riduzione delle trazioni secondo la legge coesiva pre-definita (vincolo bilaterale). Essa viene simulata come problema coesivo omonomo (fittiziamente reversibile [3]) ed arrestata prima del raggiungimento del valore di picco. A questo punto inizia una seconda fase a carico costante durante la quale la crescita della fessura è dovuta al rilassamento delle tensioni nella zona di processo. Durante questa fase sono attesi scarichi locali e quindi essa viene

simulata come problema coesivo anolonomo e si ha il raggiungimento del collasso quando la matrice di rigidità tangente, che include i contributi di segno negativo indotti dal softening, perde la condizione di definitezza positiva ([4], [5]). La modellazione della seconda fase rappresenta l'aspetto che si ritiene innovativo.

3. La propagazione subcritica della fessura sotto carichi ciclici (fatica)

La propagazione subcritica può essere indotta anche da carichi ciclici. In questo problema il ciclo di carico gioca un ruolo analogo a quello dell'incremento di tempo nel problema precedente. Come modello in grado di prevedere l'evolversi dello stato tensionale nella zona di processo durante un ciclo di scarico e ricarica è stato assunto quello di Hordijk [6], fermo restando il modello di Huang-Li [2] per analizzare la micromeccanica della zona di processo. Come nel caso precedente, in un generico punto della zona di processo, il percorso delle tensioni in funzione della discontinuità di spostamento non è definito a priori ma dipende dall'evolversi del fenomeno di interazione tra risposta per fatica e crescita della fessura. Come nel caso precedente, il processo di analisi prevede una prima fase a carico crescente, simulata come problema coesivo omonomo ed arrestata prima del raggiungimento del valore di picco. A questo punto inizia una seconda fase a carico ciclico durante la quale la crescita della fessura è dovuta alla riduzione delle tensioni nella zona di processo. Questa fase è simulata come problema coesivo anolonomo e si ha il raggiungimento del collasso quando la matrice di rigidità tangente, che include i contributi di segno negativo indotti dal softening, perde la condizione di definitezza positiva. Per quanto riguarda l'effetto di carichi ciclici di *ampiezza variabile* (quali sono quelli di origine sismica) si è osservato che l'uso del modello di Hordijk per prevedere il cumulo del danno in alcuni casi conduce a risultati non realistici [7].

4. La frattura idraulica del giunto di fondazione

Le dighe a gravità sono progettate in modo che, a meno di piene eccezionali (tali che il livello dell'acqua superi ampiamente la sommità della diga) il lembo di monte sia ovunque compresso, incluso il giunto di fondazione. In queste condizioni mancano quindi le premesse per la propagazione di una fessura di trazione. La presenza di un difetto sul paramento di monte può tuttavia consentire la penetrazione dell'acqua in pressione. In questo caso, se il difetto è sufficientemente grande, nasce una tensione di trazione che può indurre la crescita del difetto stesso. Questo fenomeno, chiamato *frattura idraulica*, è stato studiato da Bolzon e Cocchetti [8] con riferimento al giunto tra la diga e la fondazione. In particolare, con riferimento al piano del giunto, viene considerato sia il degrado della resistenza normale sia di quella tangenziale (problema accoppiato). Vengono tenuti in conto i fenomeni di *attrito* e di *dilatazione*, oltre a varie leggi di distribuzione della *pressione idraulica interstiziale*. Poiché il processo evolutivo è di tipo progressivo, senza l'insorgenza di fenomeni di richiusura o scarico locale, il modello è di tipo *olonomo*. Ogni passo del processo evolutivo si configura come un problema di *programmazione matematica*, che può essere lineare o non-lineare.

Le analisi numeriche sono state condotte sugli esempi proposti dall'ICOLD [9]. Essi riguardano sia il caso in cui è presente la sola componente normale della discontinuità di spostamento (resistenza tangenziale illimitata), sia il caso in cui è presente anche la componente tangenziale.

5. Analisi della localizzazione della fessura con il metodo degli elementi finiti estesi

Quando un materiale eterogeneo come il calcestruzzo è sottoposto ad un forte stato tensionale di trazione, dapprima si verifica una crescita delle *microfessure* e dei microdifetti. Solo in un secondo tempo si verifica la *localizzazione* delle deformazioni in una stretta zona, chiamata zona di processo, dove nasce una *discontinuità di spostamento*.

Per analizzare correttamente questo fenomeno, Mariani e Perego [10] hanno messo a punto una estensione del metodo degli elementi finiti che consente di *arricchire localmente* le funzioni di forma inserendo delle discontinuità di spostamento pressochè indipendenti dal reticolo pre-esistente. In questo modo è possibile studiare la localizzazione della fessura in qualsiasi posizione essa si verifichi, senza modificare il reticolo impostato inizialmente. Viene infatti eliminata l'esigenza che la fessura cada all'interfaccia tra due elementi. Questo approccio ha consentito anche di incorporare un modello di danno *non-locale* proposto da Comi [11] utile per valutare le condizioni che governano la localizzazione di una fessura discreta all'interno di una zona caratterizzata da fessurazione diffusa.

Riferimenti bibliografici

- [1] S. Santhikumar and B. L. Karihaloo. Time-dependent tension softening. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1:295-304, 1996.
- [2] J. Huang and V. Li. A meso-mechanical model of the tensile behaviour of concrete. *Composites*, 20:370-378, 1989.
- [3] F. Barpi and S. Valente. Numerical simulation of prenotched gravity dam models. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 126(6):611-619, 2000.
- [4] F. Barpi and S. Valente. Creep and fracture in concrete: A fractional order rate approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 70:611-623, 2003.
- [5] F. Barpi and S. Valente. Fuzzy parameters analysis of time-dependent fracture of concrete dam models. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 26:1005-1027, 2002.
- [6] D.A. Hordijk. *Local approach to fatigue of concrete*. PhD thesis, Delft University (The Netherlands), 1991.
- [7] F. Barpi and S. Valente. Modeling of fatigue crack growth in concrete. In An.Carpinteri and L.P.Pook, editors, *Fatigue Crack Paths*, pages 99, full paper on CD, 2003.
- [8] G. Bolzon and G. Cocchetti. Direct assessment of structural resistance against pressurized fracture. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27:353-378, 2003.
- [9] ICOLD. Theme A2: Imminent failure load for a concrete gravity dam. In *Fifth International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams*, Denver, CO, 1999.
- [10] S. Mariani and U. Perego. Extended finite element method for quasi-brittle fracture. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 58:103-126, 2003.
- [11] C. Comi. A non-local model with tension and compression damage mechanisms. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 20:1-22, 2001.

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino
e-mail: silvio.valente@polito.it*

Interazioni tra diga e ammasso roccioso di fondazione

Nella progettazione di dighe in calcestruzzo e nell'interpretazione del loro comportamento è nota da tempo l'importanza di un'efficace modellazione del flusso dell'acqua in fondazione [Casagrande, 1961]. Tale moto di filtrazione avviene principalmente nella rete di discontinuità dell'ammasso roccioso ed è quindi fortemente influenzato dalle caratteristiche delle singole discontinuità (apertura, scabrezza, orientazione, riempimento, alterazione) e dalla loro interconnessione.

Numerosi lavori sperimentali hanno mostrato che il flusso in una singola discontinuità risente significativamente delle variazioni di apertura della stessa. Questa dipendenza della permeabilità dallo stato deformativo dei giunti determina la presenza di un accoppiamento idro-meccanico che si aggiunge a quello già osservato più in generale nei mezzi porosi saturi e descritto, ad esempio, dalla teoria della consolidazione di Terzaghi.

Nella presente ricerca, l'interazione diga-ammasso è studiata facendo ricorso alla teoria della poro-elastoplasticità di Biot [1941] e Coussy [1995], estesa al caso di permeabilità variabile con lo stato di deformazione. In particolare, è stato considerato un modello di permeabilità dipendente dalle deformazioni normali alle discontinuità esistenti nell'ammasso [Liu et al., 1999]. L'ammasso discontinuo viene quindi trattato come un "continuo equivalente" e questa ipotesi semplificativa sembra accettabile nei problemi relativi ad opere di sbarramento. Infatti, nella maggior parte dei casi, questi problemi sono caratterizzati da un elevato rapporto fra la dimensione caratteristica del problema (ad es. la base della diga) e la spaziatura dei giunti.

Si osserva, in letteratura, che le analisi numeriche del sistema diga-fondazione sono tipicamente svolte nelle ipotesi semplificative di permeabilità costante o di disaccoppiamento fra il problema idraulico e quello meccanico [Manfredini et al., 1975; Erban e Gell, 1988; Duarte Azevedo et al., 1998]. Per quanto a noi noto, l'unica analisi pienamente accoppiata dell'interazione tra diga e ammasso roccioso con permeabilità variabile è riportata in [Fauchet et al., 1991]. In quest'ultimo lavoro l'attenzione è concentrata più sulla diga che sulla fondazione, come evidenziato, fra l'altro, dalla scelta di un modello di permeabilità più adatto al calcestruzzo che all'ammasso roccioso.

Al contrario, la presente ricerca è finalizzata soprattutto alla valutazione del ruolo svolto dall'ammasso nella risposta idro-meccanica del sistema diga-fondazione. Ad esempio, uno degli obiettivi è stimare gli effetti delle variazioni di permeabilità sulle pressioni interstiziali alla base della diga (le cosiddette "sottopressioni"). A tal fine, una formulazione agli elementi finiti della suddetta teoria della poro-elastoplasticità è utilizzata per simulare la costruzione di una ipotetica diga a gravità ed il successivo invaso del serbatoio. Questa formulazione numerica, originariamente sviluppata nell'ambito di un'altra ricerca [Callari e Armero, 2002], è qui estesa al caso di permeabilità variabile in funzione dello stato deformativo.

Il modello poroplastico adottato permette di valutare, fra l'altro, gli effetti sulla diga indotti sia dal carico idrostatico sul fondo del serbatoio [Bonaldi et al., 1978] che da elevate velocità d'invaso registrate in eventi di piena.

Le distribuzioni calcolate per spostamenti, perdite e pressioni interstiziali nonché l'evoluzione di queste grandezze con la quota d'invaso sono confrontati con i risultati del monitoraggio di opere esistenti [Ruggeri, 2001; ICOLD, 1976; 2000]. Sulla base di tale confronto si sviluppa l'interpretazione di alcuni comportamenti tipicamente osservati.

⁴in collaborazione con Nicolino Fois e Rodolfo Cicivelli.

Riferimenti bibliografici

Biot, M.A. (1941), General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *J. of Applied Physics*, 12, 155-164.

Bonaldi P., Fanelli M., Giuseppetti G., Riccioni R. (1978) Effetto della deformazione del bacino sugli spostamenti di dighe a gravità, *XIII Convegno Nazionale di Geotecnica*, Merano, 1978, Vol.2, pp. 43-51.

Casagrande A. (1961), Control of seepage through foundations and abutments of dams, First Rankine Lecture, *Géotechnique*, Vol.XI, pp 161-182.

Callari, C. e Armero, F. (2002), Finite element methods for the analysis of strong discontinuities in coupled poroplastic media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 191, 39-40, 4371-4400.

Coussy, O. (1995), *Mechanics of Porous Continua*, Wiley, Chichester.

Duarte Azevedo I.C., Vaz L.E., Vargas E.A. (1998), A numerical procedure for the analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses, *Int. J. Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 22, pp. 867-901

Erban P. J. e Gell K. (1988), Consideration of the Interaction Dam and Bedrock in a Coupled Mechanic-Hydraulic FE-Program, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, n. 21, pp., 99-117.

Fauchet B., Coussy O., Carrère A., Tardieu B. (1991), Poroplastic analysis of concrete dams and their foundations, *Dam Engineering*, Vol. 2, n. 3, pp. 165-192.

ICOLD (1976), Leakage investigations and drainage of dams and their foundations, Vol. 2, Question n. 45, *ICOLD Twelfth Congress*, Mexico City.

ICOLD (2000), Monitoring of dams and their foundation, Question n. 79, *ICOLD Twentieth Congress*, Beijing.

Liu J., Elsworth D., Brady B.H. (1999), Linking stress-dependent effective porosity and hydraulic conductivity fields to RMR, *Int. J. Mech. Sci. & Mining Sciences*, Vol.36, pp.581-596.

Manfredini G., Martinetti S., Ribacchi R., (1975) Mutual influence of water flow and state of stress in the analysis of dam foundations, *Int. Symp. on Criteria and Assumptions for Numerical Analysis of Dams*, Swansea, pp. 881-912.

Ruggeri G. (2001), Uplift Pressures under Concrete Dams - Final Report of the European Working Group on Uplift Pressures under Concrete Dams, *ICOLD European Symposium*, Geiranger, Norway, 2001, pp. 29-55.

*Università di Roma Tor Vergata -Dipartimento di Ingegneria Civile
Unità di Ricerca - Università di Cassino
e-mail: callari@ing.uniroma2.it*

Metodi per elementi di contorno nell'ingegneria delle dighe

I metodi per elementi di contorno (“boundary elements methods”, BEM) rappresentano un interessante strumento di calcolo alternativo o complementare ai metodi per elementi finiti (“finite element methods”, FEM).

Negli approcci BEM il problema da risolvere viene formulato mediante equazioni integrali al contorno opportunamente discretizzate. La caratteristica distintiva di tali approcci è la riduzione di dimensionalità del modello su cui occorre operare la discretizzazione: nel caso di un problema tridimensionale è richiesta la discretizzazione della sola superficie di contorno (insieme, naturalmente, alla modellazione dei campi incogniti su tale superficie). Una volta determinate le incognite nodali sul contorno, che nei metodi BEM rappresentano le incognite primarie, la risposta in punti interni può essere calcolata in modo selettivo mediante “quadrature”.

Se si pongono a confronto un modello BEM ed uno FEM realizzati per un assegnato problema con l'intento di pervenire a due soluzioni approssimate di accuratezza paragonabile, il primo sarà caratterizzato da un numero di incognite (al contorno) notevolmente inferiore a quelle (di dominio) mobilitate dal secondo. Da ciò però non consegue necessariamente una maggior efficienza computazionale delle procedure BEM in quanto il sistema di equazioni nelle incognite di contorno è a matrice densa (e in generale non simmetrica e non definita in segno) mentre la matrice del sistema risolvete nelle procedure FEM è sparsa (a banda, simmetrica e definita positiva). Risulta quindi cruciale, soprattutto per problemi ad elevato numero di variabili, migliorare l'efficienza delle procedure BEM sul piano computazionale per consentire un'efficace applicazione del metodo anche nella simulazione di sistemi complessi.

L'analisi statica tridimensionale di dighe in calcestruzzo e di sistemi diga-fondazione, svolta in campo elastico lineare in presenza di eventuali non-linearità costitutive localizzate su superfici (fratture e/o giunti), rappresenta un contesto in cui i metodi per elementi di contorno possono rappresentare una valida alternativa ai metodi per elementi finiti. Qualora si voglia tener conto di non-linearità costitutive (plasticità, danneggiamento) in alcune zone del sistema, gli approcci BEM richiedono anche una discretizzazione di dominio che ne pregiudica almeno in parte l'attrattiva; in queste situazioni si può ricorrere all'impiego di procedure accoppiate BEM-FEM in cui il BEM viene riservato alla porzione del sistema che permane in campo elastico.

L'attività di ricerca svolta presso l'Università di Trento nell'ambito del progetto cofinanziato dal MIUR ha riguardato lo sviluppo e la validazione numerica di procedure BEM e BEM-FEM per l'analisi di sistemi diga-fondazione modellati quali continui elastici tridimensionali, omogenei a zone. Le sottoregioni individualmente omogenee che compongono il sistema sono tipicamente costituite da diga, pulvino e rocce di fondazione (ma l'articolazione in sottoregioni potrebbe essere maggiore). Le equazioni integrali vengono scritte in forma discretizzata separatamente per ciascuna zona; successivamente, imponendo le opportune condizioni di raccordo alle interfacce, esse vengono assemblate dando luogo al sistema globale.

I termini di volume relativi alla forza peso presenti nelle equazioni integrali sono “portati al contorno” (trasformandoli in integrali di superficie) evitando così l'introduzione di celle di dominio.

Le procedure sviluppate nell'ambito della presente ricerca utilizzano sia il tradizionale approccio per collocazione basato sulla sola equazione integrale negli spostamenti, sia il più recente approccio simmetrico alla Galerkin (“symmetric Galerkin boundary element method”, SGBEM) che fa uso anche dell'equazione integrale nelle

trazioni e si caratterizza per le doppie integrazioni sulla superficie di contorno. La tecnica SGBEM (descritta in M. Bonnet, G. Maier e C. Poliziotto, *Applied Mechanics Reviews*, vol.51, n.11, pp.669-703, 1998) conferisce simmetria ad alcune importanti matrici che risultano invece non simmetriche nell'approccio per collocazione: la matrice del sistema lineare nelle incognite di contorno e quella di rigidità. Proprio la simmetria di questa ultima matrice induce a realizzare procedure di accoppiamento SGBEM-FEM, ottenendo così un sistema risolvibile finale a matrice simmetrica (dettagli in A. Frangi, G. Novati, *Computational Mechanics*, vol.32, pp.415-422, 2003).

Notevole attenzione è stata dedicata ad aspetti inerenti al miglioramento dell'efficienza computazionale delle procedure BEM. Su questo fronte la recente letteratura documenta importanti sviluppi legati all'avvento di tecniche "fast multipole" abbinabili agli approcci BEM (dettagli in N. Nishimura, *Applied Mechanics Reviews*, vol.55, n.4, pp.299-324, 2002) che consentono di ridurre i tempi di soluzione da $O(N^2)$ a circa $O(N \log N)$, essendo N il numero delle incognite. Nell'Unità di Ricerca si è sviluppata una procedura BEM (per collocazione) con tecnica "fast multipole" che è stata applicata a un sistema diga-fondazione verificando l'accuratezza dei risultati ottenuti mediante confronti con soluzioni FEM (dettagli nella tesi di dottorato di M. Margonari e in un articolo sottoposto a rivista di M. Margonari e M. Bonnet, 2003).

Infine un'altra tematica che può utilmente essere affrontata con i metodi per elementi di contorno è costituita dalla valutazione delle "masse addizionali" che intervengono nella simulazione dinamica dell'interazione diga-bacino svolta in modo disaccoppiato. La valutazione di tali masse può effettuarsi attraverso la risoluzione di problemi "a potenziale" definiti sul volume occupato dal lago artificiale (si veda, per esempio, M. Fanelli, P. Palumbo, *Ingegneria del Agua*, vol.5, n.2, pp.43-54, 1998), che ben si prestano ad essere efficacemente risolti mediante tecniche BEM.

Università di Trento
e-mail: novati@argon.ing.unitn.it

L'invecchiamento del calcestruzzo nelle dighe

Nell'ambito dell'ingegneria delle dighe in calcestruzzo il problema dell'invecchiamento è di notevole interesse perché può alterare le caratteristiche e le proprietà di queste strutture fino a coinvolgerne la funzionalità e persino la sicurezza. Si tratta di un processo piuttosto complesso. I cambiamenti correlati all'età variano infatti da caso a caso per un duplice ordine di fattori che comprendono, da una parte, la qualità della progettazione, della realizzazione e dei materiali posti in opera all'epoca della costruzione, connessi alla tecnologia all'epoca disponibile e, dall'altra, l'effetto di azioni ambientali esterne di tipo meccanico, fisico e chimico e delle condizioni di esercizio della diga in relazione al territorio circostante (serbatoio, relative sponde e tronco d'alveo a valle della diga).

In questa nota ci si limita all'esame di quelle problematiche connesse all'invecchiamento del materiale calcestruzzo del corpo diga, con riferimento sia alla qualità dei materiali usati, al mix design adottato ed alla tecnica seguita per la sua posa in opera che ai processi di degrado delle proprietà del calcestruzzo innescati dalle azioni ambientali esterne.

L'evoluzione della tecnologia del calcestruzzo delle dighe e la sua influenza sulla loro durabilità

La qualità del calcestruzzo originario di una diga gioca un ruolo fondamentale sull'evoluzione del suo invecchiamento: il potenziale sviluppo del degrado è infatti spesso già insito nella concezione del calcestruzzo originario ed il tempo è solo il fattore che ne condiziona l'insorgere ed il progredire. In Italia, dopo un iniziale predominio delle dighe in muratura di pietrame e malta di calce (inizio del XX secolo), le prime dighe in calcestruzzo sono state realizzate con cemento portland cui sono seguiti cementi sempre più specializzati, messi a punto per soddisfare, oltre che il raggiungimento delle prestazioni meccaniche, le specifiche di un modesto calore di idratazione e di resistenza al dilavamento delle acque pure ed all'azione delle acque aggressive. A poco a poco hanno preso piede i cementi pozzolanici che dovevano in seguito costituire la regola nelle dighe italiane. Anche il processo di progettazione delle miscele e di posa in opera del calcestruzzo ha seguito una considerevole evoluzione: dagli iniziali calcestruzzi a consistenza di terra umida con rapporti acqua/cemento relativamente bassi, che venivano però posti in opera manualmente, si è passati, dopo gli anni '30, a calcestruzzi molto fluidi, o "colati", con elevati rapporti acqua/cemento, messi in opera mediante apposite canalette. Solo dalla fine degli anni '30, grazie ai progressi nella tecnologia del calcestruzzo, accompagnati parallelamente allo sviluppo di sistemi più razionali per il dosaggio dei materiali (prima a volume poi a peso), per il loro impasto, trasporto, distribuzione e posa in opera (per vibrazione), si ebbe un sostanziale miglioramento della qualità del calcestruzzo (resistenza meccanica, compattezza, impermeabilità e durabilità, in particolare nei riguardi del gelo). Con la rapidità della posa in opera si sono ridotti anche i problemi legati ai "giunti freddi" tra un getto e l'altro con pericoli di infiltrazione e scarsa aderenza tra gli strati. Con questi calcestruzzi si è passati dalle dighe a gravità a quelle ad arco-gravità, ad arco ed alle prime dighe a gravità alleggerita. Ulteriori miglioramenti si sono in seguito avuti con impianti di produzione del calcestruzzo computerizzati e con le compattazioni sempre più sofisticate fino all'introduzione dei rulli vibranti.

Questo spiega perché gli invecchiamenti più rapidi, con degrado per effetto del gelo e dell'azione aggressiva dell'acqua, si sono da tempo già manifestati in particolare sui calcestruzzi più permeabili delle dighe costruite sino agli anni '20 e '30. Attualmente, dopo

decine di anni di esercizio, l'azione aggressiva dell'ambiente si sta progressivamente estendendo anche ai calcestruzzi con migliore qualità e soprattutto si stanno manifestando gli effetti dei processi più lenti, quali ad esempio la reazione espansiva alcali-aggregato, che coinvolge particolarmente i calcestruzzi più compatti realizzati anche dopo gli anni '40.

La reazione alcali-aggregato nel calcestruzzo delle dighe

La reazione alcali-aggregato si può manifestare nelle strutture in calcestruzzo in cui siano stati utilizzati aggregati contenenti fasi reattive agli alcali. Nella maggior parte dei casi, queste fasi sono costituite da forme di silice amorfa, microcristallina o criptocristallina, in altri casi, da minerali e rocce silicatiche, quali ad es. argilliti, filliti, areniti, graniti, scisti. In tutti questi casi, si parla di reazione alcali-silice, dal momento che il componente reattivo è sempre silice termodinamicamente instabile. Tuttavia, la velocità con cui si manifesta la reazione, come pure la sua durata, dipendono grandemente dalle forme di silice reattiva presenti nell'aggregato. La reazione è relativamente veloce e di durata limitata nel caso di forme di silice scarsamente cristallina. In questi casi, le fessurazioni delle strutture incominciano a manifestarsi entro 5-10 anni e la reazione è praticamente completa dopo 10-20 anni. Decisamente più lente e di più lunga durata (molti decenni) sono, invece, le reazioni che interessano i minerali del quarzo. E' quest'ultima la situazione più frequente nelle dighe in cui i fenomeni espansivi cominciano a manifestarsi solo dopo diverse decine di anni, solitamente attraverso anomali derive degli spostamenti del coronamento delle dighe (livellazioni e collimazioni), eventualmente associati a stati fessurativi, disallineamenti e a problemi di movimentazioni agli organi di manovra degli scarichi.

Diversi sono i motivi per cui le dighe sono particolarmente interessate a questi fenomeni. Innanzitutto, l'acqua gioca un ruolo fondamentale nella reazione alcali-aggregato, innescando i fenomeni espansivi. In secondo luogo, all'epoca della costruzione, le conoscenze su questo fenomeno non esistevano, od erano scarse, e di conseguenza gli aggregati del calcestruzzo non venivano valutati preventivamente da questo punto di vista. Infine, poiché l'età media delle dighe è elevata (oltre 50 anni) e i volumi di calcestruzzo in gioco sono di notevole entità, anche i fenomeni lenti nel tempo e di modesta entità hanno la possibilità di manifestarsi con effetti ingegneristicamente importanti. Senza contare che le dighe attualmente in esercizio sono destinate ad essere utilizzate ancora per molto tempo.

Tutto ciò induce a prevedere che il rischio di degrado per reazione alcali-aggregato nelle dighe in calcestruzzo esistenti sia purtroppo destinato ad aumentare in futuro, richiedendo interventi di ripristino basati su una corretta diagnosi del fenomeno e su una stima affidabile del comportamento futuro.

Altri fattori ambientali sull'invecchiamento del calcestruzzo delle dighe

Tra gli altri fattori ambientali che possono influire sull'invecchiamento del calcestruzzo delle dighe i più frequenti sono l'espansione per attacco dei solfati presenti nelle acque o nei materiali componenti il calcestruzzo, l'espansione per anomali assorbimenti d'acqua, il dilavamento della calce idrata dal calcestruzzo, il deterioramento dovuto ai cicli di gelo e disgelo e l'erosione per effetto del trasporto solido delle acque, particolarmente sulle opere di sfioro.

*CESI SpA – Milano
e-mail: BERRA@cesi.it*

Ipotesi di linee guida per la verifica delle "vecchie" dighe murarie

La memoria riassume i principali aspetti delle Linee guida elaborate, su incarico del Capo Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali del 2/05/2000, da un apposito Gruppo di lavoro che ha portato a termine il proprio compito nell'ottobre del 2003.

I principali aspetti delle Linee guida, previsti dal Gruppo di lavoro per la verifica delle "vecchie" dighe, riguardano:

- le condizioni che possono portare ad una "riverifica" delle opere esistenti (le condizioni ambientali diverse da quelle previste, il comportamento anomalo delle opere, i processi d'invecchiamento delle opere o dei terreni di fondazione e l'obsolescenza);
- i criteri di verifica che indicano, peraltro, le azioni e la combinazione di norma da considerare e le modalità di valutazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali (paragrafo 11.3 delle Linee guida, per le dighe in muratura di pietrame e malta, ed Allegato E alle Linee guida per le dighe in calcestruzzo);
- i requisiti di funzionalità e stabilità che gli sbarramenti (ivi comprese le fondazioni, le opere di scarico e le opere accessorie) dovranno con adeguato margine soddisfare, evidenziando i relativi limiti per gli stati tensionali e per le analisi di stabilità allo scorrimento e prevedendo delle analisi di sensibilità per valutare i livelli d'incertezza connessi con i diversi fattori che intervengono nei modelli di calcolo (caratteristiche fisico-meccaniche della struttura e della fondazione, tipo ed affidabilità dei modelli adottati per rappresentare il comportamento della struttura e della fondazione, entità e probabilità delle azioni previste nelle diverse combinazioni di carico, grado di efficienza attuale e futuro dei dispositivi di tenuta e drenaggio, ogni altro fattore che possa influire in misura determinante sui risultati delle analisi e delle verifiche).

Per gli interventi le Linee guida rimandano alle indicazioni riportate nei bollettini ICOLD n.93 ("Ageing of Dams and Appurtenant works") del 1993 e n.107 ("Concrete Dams-Control and treatment of cracks") del 1995 dove i degradi, che si manifestano entro i primi 5 anni di esercizio dell'impianto, vengono convenzionalmente attribuiti ad insufficienze progettuali, a difetti di costruzione o alla non corretta messa in esercizio. Pertanto la memoria si limita a richiamare, per le dighe in muratura di pietrame, la classificazione degli interventi riportati in dettaglio nell'apposito allegato alle Linee guida (Allegato "G"), facendo solo un quadro della tipologia degli interventi in relazione alla loro finalità (di stabilizzazione o di riduzione delle permeazioni) ed ai condizionamenti sulla gestione dell'impianto (eseguibili senza significativi pregiudizio alla esercizio o, invece, richiedenti la vuotature del serbatoio).

Registro Italiano Dighe
e-mail: giulio.dilemma@apat.it

Conseguenze della reazione alcali-aggregati sul comportamento strutturale della diga di Pianteleccio e possibili interventi

La diga di Pianteleccio, sita in Valle Orco, fu costruita dall'AEM nel periodo 1951-56 per la formazione di un serbatoio di accumulo stagionale, con normale ritenuta a quota 1917 m s.l.m. e volume utile di regolazione di 22.135.000 m³.

La struttura in calcestruzzo, del tipo ad arco-gravità, con altezza di massima ritenuta 79 m e sviluppo del coronamento di 515 m, si è comportata normalmente durante i suoi primi venti anni di esercizio, mentre a partire dalla fine degli anni '70 è iniziato un processo di deriva verso monte. Attualmente la componente irreversibile della deformazione radiale a coronamento ha raggiunto circa 40 mm, oltrepassando la componente reversibile annua.

Le analisi chimiche del calcestruzzo hanno accertato la presenza di aggregati reattivi (quarzi amorfi) ed evidenziato l'esistenza di prodotti di neo-formazione (gel di ettringite), tipici del fenomeno di reazione alcali-aggregati (AAR), che hanno indotto un rigonfiamento della struttura, associato alla comparsa di alcune fessure nei cunicoli radiali superiori a quota 1883 m s.l.m.

Ad eccezione delle misure di deformazione, gli altri dati di monitoraggio dell'opera non evidenziano fenomeni evolutivi o non reversibili (infiltrazioni e sottopressioni). Anche le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo non sembrano ad oggi essere influenzate dalla reazione in corso.

Nel corso degli ultimi anni, allo scopo di analizzare lo stato di sicurezza attuale e a breve termine dello sbarramento, l'AEM con il supporto specialistico di consulenti ha sviluppato approfonditi studi interpretativi sull'origine e l'evoluzione del fenomeno in atto, anche in relazione alle richieste espresse dal Registro Italiano Dighe (R.I.D.) nell'ambito delle attività istituzionali di controllo e vigilanza sull'esercizio del serbatoio. In sintesi, dal risultato finale delle valutazioni, condotte in particolare dallo Studio Lombardi SA – Ingegneri Consulenti, sono emerse le considerazioni seguenti:

- le fessure rilevate nei cunicoli non comportano in alcun modo una diminuzione della sicurezza strutturale dell'opera;
- in condizioni d'esercizio normali la sicurezza della diga è soddisfacente almeno sino al 2006;
- in alcune condizioni di carico idrostatico e termico le sollecitazioni di compressione superano i valori delle tensioni ammissibili previsti dal vigente regolamento dighe.

Nell'ambito del programma di automazione e perfezionamento della sorveglianza delle proprie dighe in Valle Orco, è stato quindi approntato dallo stesso Studio Lombardi uno specifico modello interpretativo comportamentale per il costante controllo e la puntuale verifica delle reali condizioni di sicurezza della diga.

La reazione è stata modellata come rigonfiamento anisotropo, considerando quindi lo stato tensionale, ed il conseguente grado di confinamento dell'elemento in cui si sviluppa la reazione, e aggiornando nel tempo il potenziale di rigonfiamento.

Nelle simulazioni sviluppate sono state calcolate deformazioni e tensioni del corpo diga per diverse condizioni estreme di esercizio (serbatoio pieno e vuoto, temperatura estiva ed invernale), sovrapponendo le tensioni indotte dalla reazione AAR.

I risultati hanno evidenziato come la condizione estrema più gravosa per l'esercizio sia quella estiva con serbatoio vuoto (inusuale nella normale gestione del serbatoio), che induce elevate compressioni al piede di monte. Con serbatoio pieno risultano invece più importanti le compressioni sugli archi nella parte superiore, tra quota 1890 m s.l.m. e il coronamento. In prima analisi, il modello ha portato a ritenere attendibile a breve termine (5 anni) un incremento delle sollecitazioni nel corpo diga del 5-10% e della compressione al piede di monte del 15%, associati ad un aumento della componente non reversibile della deformazione di circa il 20%.

Il confronto delle misure di monitoraggio con i risultati del modello ha portato a stimare un rigonfiamento in direzione orizzontale di circa 200 m/m nella parte superiore dello sbarramento e praticamente nullo nella parte inferiore che, di fatto, viene "trascinata" verso monte. Detto aspetto trova parziale giustificazione nella diversa permeabilità del calcestruzzo, per riduzione della componente fine, riscontrata durante le prove condotte in corso d'opera.

Attualmente, la disponibilità del modello consente di esercire il serbatoio operando:

- il controllo della plausibilità delle misure acquisite dal sistema di monitoraggio sulla base di un modello statistico basato sulle osservazioni storiche, in rapporto ai carichi agenti sulla struttura;
- l'interpretazione immediata e affidabile delle misure acquisite sulla base di un modello deterministico, per consentire di verificare il regolare comportamento della struttura, in termini deformativi; il modello pone a confronto le deformazioni attese, calcolate in relazione ai carichi agenti sulla struttura, con le misure effettive acquisite dal sistema di monitoraggio;
- l'implementazione delle misure relative alla nuova strumentazione integrativa installata nel 2002, in particolare dei termometri in corpo diga e dei teledilatometri sul giunto perimetrale;
- la taratura del modello, sulla base delle misure acquisite dalla nuova strumentazione, per valutare con maggiore affidabilità l'effettivo stato tensionale.

Obiettivi principali del modello allestito sono quindi:

- il controllo immediato e costante del regolare comportamento strutturale;
- la verifica delle effettive condizioni di sicurezza dello sbarramento;
- il supporto all'interpretazione di eventuali anomalie rilevate dal sistema di monitoraggio mediante superamento dei limiti di plausibilità e/o di tolleranza delle misure.

Nell'agosto 2003, in relazione al già citato superamento delle tensioni ammissibili previste dalla normativa vigente, il R.I.D. ha richiesto la presentazione di un piano di gestione temporanea del serbatoio, in attesa dei futuri interventi di risanamento.

Il piano, predisposto dallo Studio Lombardi e autorizzato dal R.I.D. per il triennio 2004-2006, prevede limitazioni del livello di invaso variabili nel corso dell'anno in funzione del carico termico medio della struttura. Detti limiti sono da intendersi come livelli di minimo svaso, ovvero occorre esercire il serbatoio al disopra della "curva di limitazione".

Considerate le importanti ripercussioni economiche connesse al piano di gestione è stata infine accelerata la progettazione degli interventi di risanamento, finalizzati a ricondurre lo stato tensionale entro i limiti normativi.

In linea di principio è prevista l'esecuzione di una serie di tagli verticali nella parte superiore dello sbarramento, sopra il cunicolo superiore, eseguiti con la tecnica a filo diamantato e la successiva iniezione dei tagli a tratte di sviluppo limitato. L'esatta altezza dei tagli e il loro numero saranno definiti in rapporto ai risultati dell'analisi strutturale.

Considerata la possibilità che la reazione prosegua, il piano di risanamento è concepito in modo da facilitare la ripetizione dell'intervento, ad intervalli di tempo da

definirsi in funzione dell'intensità dell'espansione o dello spostamento verso monte della struttura.

A.E.M. Torino S.p.A
e-mail: nicola.brizzo@aem.torino.it

Effetti degli stati fessurativi sul comportamento misurato e calcolato delle dighe in calcestruzzo

E' viva l'attenzione della comunità professionale verso la comprensione ed il dominio degli effetti del degrado strutturale delle dighe in calcestruzzo.

Tale materiale ha dimostrato eccellenti capacità di mantenere le qualità, strutturali e di barriera idraulica, per le quali viene eletto. Nondimeno, le caratteristiche proprie di rigidità e deformabilità e le modalità peculiari con cui in giovane età si sviluppano, lo espongono, se non convenientemente considerate, al rischio di sviluppare discontinuità della massa strutturale, queste sì capaci di moltiplicare le vie d'accesso degli agenti di degrado e, in taluni casi, di alterare i meccanismi 'virtuosi' di trasmissione dei carichi cui si affida la sicurezza strutturale. La portata delle conseguenze appena descritte deve essere valutata, caso per caso, tenendo in considerazione tipologia strutturale, caratteristiche specifiche dei materiali, nonché le condizioni ambientali prevalenti. La valutazione del comportamento misurato fornisce preziose informazioni sulle caratteristiche evolutive di queste formazioni e base imprescindibile di calibrazione dei metodi di calcolo.

Le osservazioni possibili sono di tipo puntuale e/o globale. Le prime riguardano il rilievo visivo, i prelievi e le misure morfologiche, esami con traccianti, lettura di strumenti per la lettura delle deformazioni d'apertura e slittamento dei lembi della fessura o di zone in cui ci si attende la formazione di fessure. Le seconde si concentrano sulla valutazione dell'influenza delle fessure sulla risposta strutturale. In questa categoria si distinguono le prove ed i rilievi dinamici in sito che sono divenuti strumento prezioso dell'indagine strutturale, fornendo gli elementi per l'identificazione, attraverso l'analisi inversa, della rigidità delle strutture. Letture di spostamento e di rotazione possono essere utilizzate agli stessi scopi.

Tali indagini e misure debbono essere cadenzate nel tempo, regolarmente o successivamente ad eventi rilevanti, perché si possa trarre il massimo vantaggio per l'identificazione degli effetti dei singoli eventi fessurativi. Questi ultimi debbono essere infatti di estensione significativa perché, in assenza di una valutazione comparativa, se ne rilevi l'effetto anomalo sui parametri dinamici della struttura.

Nel caso delle dighe a speroni, la sensibilità della risposta strutturale rilevata dagli strumenti di spostamento in presenza o assenza del sistema fessurativo più tipico, da ritiro impedito, è piuttosto contenuta e meglio interpretabile con un approccio comparativo. Ciò non costituisce un limite dei metodi, bensì un indizio che la presenza delle fessure può essere gestita globalmente dalla struttura nelle sue condizioni di esercizio.

Indubbiamente, il problema da risolvere consiste nel valutare l'effetto che questi difetti hanno sulla durabilità dei materiali e sui margini di sicurezza disponibili per la struttura.

A tale fine è fondamentale avere cognizione delle caratteristiche evolutive di tali sistemi fessurativi. In tale campo, anche le misure fornite dagli strumenti di lettura installati a cavallo delle fessure sono elementi molto utili per le valutazioni di stabilità e per derivare le caratteristiche meccaniche di risposta ai carichi. Tali valutazioni sono agevolate per le strutture a gravità e a speroni, ove è più semplice l'accertamento del tracciato e della profondità delle fessure stesse.

L'impianto interpretativo fonda sui metodi della meccanica della frattura, lineare e non lineare, e sull'utilizzo di modelli matematici, tipicamente agli elementi finiti.

Questo contributo si concentrerà sulle condizioni di stabilità delle fessure da ritiro termico in dighe a speroni, non infrequenti in questa tipologia strutturale.

Per queste fessure, causate dall'indurimento del calcestruzzo, lo stato di coazione agente, tipicamente, è svanito all'atto della valutazione. Esso chiede tempi lunghi per esaurirsi, fino a qualche anno, anche se le condizioni favorevoli ai danni si realizzano in pochi mesi, essendo questi tipicamente i tempi caratteristici delle variazioni termiche stagionali. Le proprietà di rilascio viscoso del calcestruzzo in giovane età rendono questo materiale abile a tollerare sbalzi termici anche significativi. L'estensione delle fessure da ritiro è condizionata dal rapporto di rigidità fra le stese di getto e la sottostante massa di calcestruzzo; essa solitamente non supera un terzo dell'altezza dello sperone. Le oscillazioni termiche stagionali e l'effetto dell'invaso possono successivamente produrre condizioni favorevoli alla loro estensione.

Per la valutazione della stabilità di tali fessure, i metodi della meccanica della frattura elastica lineare si sono rivelati un supporto utile, essendo progredite le tecniche di accertamento sperimentale dei parametri costitutivi del materiale, la tenacità, con l'istituzione di prove che utilizzano campioni di volume adeguato a rappresentare il materiale in sito. Quest'approccio da tempo in letteratura è ritenuto adeguato nel campo delle dighe, in cui la zona di evoluzione delle fessure (la zona di processo), ove si concentrano i fenomeni di danno irreversibile, è di estensione limitata rispetto alla massa di calcestruzzo circostante. Esperimenti su modelli di speroni prefessurati eseguiti a diversa scala utilizzando tecniche di sperimentazione convenzionali per i modelli fisici a scala maggiore (1:40) e in centrifuga per quelli a scala minore (1:100, 1:150, 1:200), hanno portato ad evidenziare l'adeguatezza di tale approccio. Esperimenti condotti con carico termico (modelli in scala 1:180) hanno prodotto evidenze simili.

Tale approccio è stato applicato ad uno sperone, tipico, della diga dell'Eugio, in occasione delle valutazioni preparatorie al progetto di recupero della diga stessa. Prima dell'intervento, la maggior parte degli speroni della diga del Lago Eugio presentava fessure verticali di tipo passante sui gambi. Tipiche fessure da ritiro termico, esse si sviluppavano a partire dal piano d'imposta e mostravano un 'respiro' con periodo annuale. Nel corso degli anni il fenomeno fessurativo si era evoluto, come fu registrato durante ispezioni visive.

E' stato così possibile evidenziare che le condizioni più severe si sono verificate nel periodo di vita iniziale dell'opera e, come, successivamente, la fessura di valle ha mantenuto vitalità, a causa della variazione termica stagionale, mentre verso monte la presenza dell'invaso ha contribuito a creare condizioni di stabilizzazione.

Questo studio ha consentito di stabilire una configurazione strutturale di riferimento per valutare l'efficacia delle modalità dell'intervento di risarcimento al fine di garantire le condizioni di sicurezza.

ENEL HYDRO – ISMES Division
e-mail: rita.pellegrini@enel.it

Valutazione della sicurezza sismica delle dighe in esercizio

Il Servizio Nazionale Dighe (ora Registro Italiano Dighe) ha intrapreso fin dal 1995 una intensa attività conoscitiva riguardante le condizioni delle dighe in esercizio, verificando il rispetto delle condizioni impartite in sede di collaudo, richiedendo studi specialistici sulle varie e complesse materie attinenti la sicurezza (geologia, idrologia, geomeccanica, geotecnica, idraulica, ecc.) ed integrando i sistemi di strumentazione e controllo delle opere quando ritenuto necessario.

In tale contesto sono state individuate tutte le dighe in esercizio ricadenti in zone classificate sismiche, ai sensi della L.64/74, per le quali non erano stati effettuati - in sede di progetto o successivamente - specifici studi e verifiche di resistenza alle sollecitazioni sismiche, richiedendo pertanto ai Concessionari di procedere alle relative elaborazioni.

Per poter esaminare le verifiche presentate, e garantire una omogeneità di giudizio, il SND ha promosso nel maggio 2000 la nomina di uno specifico Gruppo di Lavoro, del quale fanno parte anche esperti del Servizio Sismico Nazionale e dell'ANPA.

Il Gruppo di Lavoro ha terminato la propria attività nel gennaio 2002, formulando le seguenti osservazioni di carattere generale:

- gli studi svolti dai Concessionari sono relativi alle sole strutture di sbarramento e non riguardano in molti casi il complesso delle opere c.d. accessorie (manufatti degli scarichi, casa di guardia, strade di accesso, ecc.) e le sponde dell'invaso;
- i vincoli tecnici posti dal D.M. LL.PP. 24.3.1982, per le dighe di nuova costruzione, sono spesso di difficile applicazione per le dighe in esercizio, sia perchè in molti casi non si dispone di una adeguata caratterizzazione dei materiali e dei terreni di fondazione, sia per l'impossibilità di rispettare i rigidi criteri dimensionali ivi prescritti (ad es. il valore del rapporto T/N per le dighe a gravità, i valori tensionali nelle dighe ad arco, il rispetto del franco nelle dighe in terra).

Ne discende che le verifiche presentate rispondono solo parzialmente ai criteri indicati dalla vigente normativa e dunque, per poter esprimere un giudizio alla luce di quanto disposto dal DM82, si renderebbero necessari, in pressoché tutti i casi, integrazioni analitiche e sperimentali.

Un esito del tutto simile, se non addirittura con maggiore impegno di risorse, sarebbe il riferimento ad altre normative, nazionali ed internazionali, o allo stato dell'arte - pure previsto dal DM 82 - che per la valutazione della sicurezza sismica introducono metodi di maggiore complessità rispetto all'impostazione prescrittiva della norma.

Di fronte a questo scenario, è sembrato opportuno ricorrere ad una graduazione delle richieste di integrazione in funzione dell'importanza delle singole opere. Tuttavia le sole caratteristiche dimensionali della diga e dell'invaso (tipicamente l'altezza della diga e il volume di invasore) non apparivano del tutto significative nel definire la maggiore o minore "importanza" dei singoli casi in esame.

Un valido riferimento è costituito dalle recenti normative di paesi europei (Spagna, Regno Unito) e americani (Canada, Stati Uniti) che stabiliscono regole di progettazione, valutazione e controllo della sicurezza delle dighe in esercizio anche in funzione del rischio che la singola opera rappresenta per il territorio di valle. Peraltro l'importanza di una classificazione delle opere di sbarramento è pure prevista dall'art.90 del D. L.vo 31 marzo 1998, n. 112 e dal decreto istitutivo del RID.

Esaminato lo stato dell'arte in materia, il suddetto Gruppo di Lavoro ha elaborato le "Raccomandazioni per la valutazione della sicurezza sismica delle dighe in esercizio", che

si ispira ai documenti e alle pubblicazioni nazionali e internazionali ed, in particolare, alle Raccomandazioni dell'ICOLD, alla normativa statunitense, canadese e inglese per quanto attiene alla impostazione del documento.

Il documento, oggetto dell'intervento previsto al Convegno, esamina dapprima gli aspetti connessi alla suddivisione delle dighe in classi di verifica e controllo, indica poi i carichi sismici da introdurre nelle verifiche (e la loro attinenza con quanto previsto nell'Ord PC 3274/2003) e fornisce infine i criteri di verifica in funzione della tipologia e dell'importanza dell'opera.

Le Raccomandazioni sono state poste all'attenzione del Consiglio Superiore dei LL.PP. e, più recentemente, della Protezione Civile nell'ambito di quanto disposto dalla citata Ord. 3274/2003.

Registro Italiano Dighe
e-mail: paolo.paoliani@apat.it

Analisi sismica di una diga a gravità alleggerita

Una tipologia di dighe piuttosto comune in Italia è stata ottenuta accostando speroni costituiti da elementi cavi di forma triangolare. Lo scopo di questo tipo di strutture è lo sfruttamento pieno della resistenza del materiale con una riduzione del volume della struttura, anche attraverso la limitazione delle sottopressioni. Una caratteristica osservabile sui diversi elementi di una stessa diga e su dighe diverse è la presenza di fessure di larghezza, estensione e forma piuttosto tipiche.

Il lavoro ha lo scopo di: 1) studiare lo sviluppo delle fessure tipiche (sulla base delle informazioni disponibili sul materiale, le fasi costruttive, le variazioni registrate di temperatura e di livello dell'acqua); 2) modellare il comportamento sismico con analisi di spinta fino a rottura e analisi dinamiche, tenendo conto dello stato fessurato della struttura; 3) esprimere un giudizio sul comportamento sismico sulla base delle conoscenze disponibili sulla pericolosità sismica in Italia.

Prima della effettuazione delle analisi sismiche, è molto importante simulare la storia dei carichi esterni ed il suo effetto sulla struttura. Partendo da studi precedenti e da alcune osservazioni dirette, è stato elaborato un modello agli elementi finiti di uno sperone con il programma ADINA, per fornire una interpretazione della tipica condizione fessurata. Questa è stata riprodotta imponendo, alle diverse zone, variazioni termiche equivalenti agli effetti del ritiro causato dalla dissipazione del calore di idratazione. Dai risultati è evidente l'effetto del ritiro in corrispondenza delle riprese di getto, caratterizzato da forti tensioni di trazione. Il quadro fessurativo ottenuto con il modello è risultato abbastanza simile alle lesioni effettivamente osservate.

Successivamente è stata applicata la pressione idrostatica sulla faccia di monte dello sperone, seguendo il più fedelmente possibile la storia di carico dovuta al riempimento dell'invaso. La distribuzione delle tensioni dopo l'applicazione del carico idrico evidenzia incrementi delle trazioni sulla faccia a monte e delle compressioni della faccia a valle e di quelle laterali. Il quadro fessurativo è quasi lo stesso rispetto a quello della fase precedente. Infatti l'applicazione di nuovi carichi è più probabile che produca l'apertura delle lesioni già formatesi precedentemente che la formazione di nuove lesioni. In generale lo stato della struttura a questo punto dell'analisi è molto diverso da quello che si sarebbe ottenuto con una analisi elastica e senza considerare le fasi costruttive.

I risultati precedenti sono stati assunti come stato iniziale per le successive analisi sismiche. Anche in questa fase si è tenuto conto del comportamento non lineare del materiale. Come studio preliminare l'azione sismica è stata modellata sotto forma di incremento dell'accelerazione orizzontale applicata alle masse dello sperone, effettuando una analisi statica (a rottura per spinta). Confrontando lo stato tensionale con quello ottenuto alla fine della fase precedente, si evidenziano concentrazioni di trazione nella zona a monte vicino il piede dello sperone ed incrementi di compressione sulla parete laterale e sul paramento di valle. Il quadro fessurativo al piede dello sperone è diverso da quello ottenuto alla fine della fase di carico precedente: si può osservare un incremento delle fessure aperte nella zona a monte ed una chiusura di fessure precedentemente aperte nella zona a valle. La distribuzione di tensioni in prossimità del collasso sembra attribuibile ad una rottura di tipo flessionale nella zona di base dello sperone.

Per le dighe in esame è stata sviluppata una analisi di pericolosità sismica, ricavando gli spettri di pseudoaccelerazione con un periodo di ritorno di 2500 anni. Da questo spettri sono stati generati artificialmente degli accelerogrammi per le analisi dinamiche non lineare, i cui risultati hanno sostanzialmente confermato quanto ottenuto con le analisi a spinta precedentemente descritte.

Registro Italiano Dighe - e-mail: adriano.desortis@protezionecivile.it

Diffusione di fluidi in mezzi porosi e segnali precursori di frattura

In alcuni laboratori degli SUA si studia il comportamento delle sabbie causato dalla pressione e dal flusso dell'acqua. Si hanno tre fasi:

- 1) redistribuzione dei grani di sabbia
- 2) riduzione elastica della dimensione dei grani
- 3) fratturazione dei grani.

Gli effetti di queste fasi portano ad una riduzione della porosità che dipende dalla pressione e dalla quantità di fluido che ha attraversato la sabbia. Le fasi 2) e 3) sono state studiate mentre la prima è stata trascurata. Si illustrerà il fenomeno di memoria associato alla fase 1).

Il fenomeno della piezoelettricità è ben noto. Esso si manifesta nella rocce quarzifere anche prima degli eventi sismici. Si mostrerà, con esperimenti di laboratorio ed in campagna, come rocce non quarzifere sottoposte a pressione emettano segnali elettromagnetici nella banda acustica prima della frattura.

*Università di Roma "La Sapienza"
e-mail: mic.caput@tiscali.it*

Le sottopressioni e la verifica a scorrimento per le dighe a gravità esistenti

Il tema delle sottopressioni nelle dighe in calcestruzzo e quello della sicurezza allo scorrimento delle dighe a gravità esistenti (verifica nella quale le sottopressioni giocano un ruolo di primario rilievo) sono stati affrontati da due Gruppi di Lavoro del Club Europeo della Commissione Internazionale delle Grandi Dighe (ICOLD).

Il primo Gruppo di Lavoro (“Sottopressioni”) i Terms of Reference ad esso assegnati nel 2001, e ha presentato il relativo “Rapporto Finale” al Simposio Europeo dell’ICOLD del Giugno 2001 (Ref.1).

Il successivo Gruppo di Lavoro (“Sicurezza allo Scorrimento”) concluderà le proprie attività nel corso del corrente anno e presenterà il “Rapporto Finale” al Simposio Europeo dell’ICOLD che si terrà a Kent (Inghilterra) ne Settembre 2004.

Ai Gruppi di Lavoro hanno partecipato esperti del settore, in rappresentanza di 10 Paesi (Italia, Francia, Spagna, Norvegia, Inghilterra, Svizzera, Germania, Svezia, Austria).

Gli argomenti prescelti e sviluppati dai due Gruppi, nell’ambito dei Terms of Reference ad essi assegnati, sono i seguenti:

Norme Tecniche o “Pratiche correnti”

Sono state raccolte informazioni sulle norme tecniche definite in vari Paesi (o, ove assenti, sulle pratiche normalmente utilizzate) per la messa in contro delle sottopressioni nelle verifiche di sicurezza e per o sviluppo delle verifiche di sicurezza allo scorrimento, con particolare attenzione alla situazione delle dighe già in esercizio.

Lo scopo non era quello di produrre una esaustiva e dettagliata raccolta, bensì quello di ottenere dati sufficienti per fare utili comparazioni e riflettere sulla omogeneità e compatibilità dei diversi approcci applicati.

Analisi di significativi studi ed esperienze reali

Sono stati esaminati con attenzione significativi studi disponibili nella letteratura tecnica, sintetizzando i risultati di maggior interesse, effettuando confronti, esprimendo riflessioni e commenti.

Per le sottopressioni, l’attenzione è stata concentrata su studi basati sull’analisi di dati reali di sottopressioni registrate in dighe in esercizio, ricercando in particolare risultati sull’influenza dei numerosi fattori che possono influenzare le sottopressioni.

Per la sicurezza allo scorrimento l’attenzione si è concentrata su studi sperimentali (indagini e prove, in sito e in laboratorio) relativi ai parametri di resistenza delle riprese di getto e della superfici di contatto diga-fondazione (discontinuità per le quali sono meno facilmente reperibili dati nella letteratura tecnica, rispetto alla più ampia letteratura tecnica geo-meccanica che offre molte esperienze sui parametri di resistenza di giunti/discontinuità in roccia).

Modelli numerici

E’ stata predisposta una sintesi dei vari approcci di calcolo utilizzati per la valutazione del campo di sottopressioni e per la verifica della sicurezza allo scorrimento, evidenziando potenzialità-limiti-difficoltà dei diversi approcci e distinguendo tra le consolidate tecniche appartenenti al campo della pratica applicazione ingegneristica e quelle appartenenti alla sfera dei servizi altamente specializzati e/o della ricerca applicata.

Verifiche di sicurezza basate sulla reale conoscenza del singolo specifico caso

Approcci di verifica convenzionali/standard risultano in molti casi inadeguati per la ri-verifica delle condizioni di sicurezza di dighe esistenti. Ogni diga in esercizio è infatti un caso “a sé”, un prototipo unico, in particolare quando in esercizio da molto tempo. E’ conseguentemente importante poter ricorrere a tecniche di verifica in grado di utilizzare e valorizzare tutte le informazioni, in molti casi assai cospicue, rese disponibili per la specifica opera in esame dalle numerose attività di controllo (monitoraggio, ispezioni, indagini, ecc.).

Effetti 3D

Una specifica riflessione è stata dedicata alle possibili modalità utilizzabili per tenere conto nelle verifiche di sicurezza di effetti tridimensionali che possono essere presenti (basti ad esempio pensare alle dighe a gravità ad asse planimetrico arcuato) e svolgere un ruolo determinante nei confronti del meccanismo resistente e dei margini di sicurezza realmente disponibili.

Tecniche per la manutenzione/ripristino dei sistemi di drenaggio

Le tecniche e le esperienze reali documentate relative alla manutenzione dei sistemi di drenaggio, o al risputino di sistemi resi inoperanti dai fenomeni di incrostazione/deposito sono state esaminate, confrontate, commentate.

Enel-Produzione
e-mail: giovanni.ruggeri@enel.it

Il calcestruzzo compattato a rullo nelle dighe di oggi e domani

Con il termine di dighe in **calcestruzzo compattato a rullo** o in **RCC (Rolled Compacted Concrete)** si designano i muri di ritenuta costruiti con calcestruzzo a consistenza secca avente scarso contenuto di cemento, gettato in sottili strati orizzontali continui, spesso estesi all'intera larghezza della vallata da spalla a spalla, compattati con rulli vibranti in analogia con la tecnica di costruzione delle dighe in terra; i giunti trasversali di contrazione, necessari per prevenire fessurazioni da ritiro, sono realizzati mediante taglio meccanico dei singoli strati dopo la compattazione.

Dopo le prime, pionieristiche realizzazioni negli anni '60 del secolo scorso delle dighe italiane di Alpe Gera e Quaira della Miniera, nelle quali peraltro non si era ancora fatto uso dei rulli vibranti, e della diga di Buchtarma in Kazakistan, questa tecnica si è evoluta alla fine degli anni '70 e già nei primi anni '80 ha portato alle grandi realizzazioni delle dighe di Shimajigawa in Giappone (1980, altezza 89 metri, 317.000 m³ di getti, di cui 165.000 di RCC) e di Willow Creek negli Stati Uniti (1982, altezza 52 m, 331.000 m³ di getti, tutti di RCC). Essa si è poi sviluppata e diffusa con rapida progressione in tutti i continenti, tanto che alla fine del 1989 erano state completate già 46 dighe in RCC. Alla fine del 2002 in 35 paesi si contavano 251 dighe in RCC con altezza maggiore di 15 m, 94 delle quali erano state realizzate negli ultimi 6 anni; alla stessa data vi erano altre 34 dighe in costruzione, aventi in media altezza di 80 m e volume di calcestruzzo RCC di 600.000 m³. La più alta diga finora costruita in RCC è quella di Miel I in Colombia, con 188 m di altezza, ultimata nel 2002; nel 2001 è incominciata la costruzione della diga di Longtan in Cina, che toccherà i 192 m.

La grandissima maggioranza delle dighe in RCC sono del tipo a gravità, ma già nel 1988 e nel 1989 ne vennero costruite in Sudafrica due ad arco-gravità: quella di Knellport, alta 50 m, e quella di Wolwedans, alta 70 m, e nel 1993 venne costruita in Cina la prima diga in RCC ad arco, quella di Puding, alta 75 m. Alla fine del 2002 si contavano complessivamente 5 dighe ad arco gravità, di cui 3 in Sudafrica e 2 in Cina, e 5 ad arco, tutte in Cina; due di queste ultime superano i 100 m di altezza (la diga di Shapai con 129 m e quella di Shimenzi con 109). Inoltre sono attualmente in costruzione in Cina altre 4 dighe ad arco, con altezza media di 83 m.

Poiché il getto e la rullatura degli strati di RCC sono operazioni meccanizzate, con tempi e ritmi più vicini a quelli della produzione industriale che a quelli dei cantieri civili tradizionali, con questa tecnica si ottiene una notevolissima contrazione dei tempi di costruzione.

La riduzione del contenuto di cemento, una caratteristica dell'RCC che comporta evidenti vantaggi in termini di costo e di sviluppo di calore di presa, è resa possibile prima di tutto dal fatto che la resistenza richiesta ai calcestruzzi per dighe è generalmente modesta, dell'ordine di 2-3 MPa a compressione nel caso di dighe a gravità anche di notevole altezza. Per assicurare altre caratteristiche che si richiedono al calcestruzzo in queste particolari applicazioni, quali la lavorabilità dei getti da sottoporre alla compattazione e l'ottenimento di elevate densità e basse permeabilità, nell'86% delle dighe in RCC finora costruite si sono aggiunte al cemento notevoli quantità di altri materiali leganti pozzolanici, la cui presenza contribuisce altresì ad aumentare la resistenza in tempi lunghi senza determinare apprezzabili aumenti del calore di presa. Il materiale legante di gran lunga più comune è la cenere volante a basso contenuto di calce, adoperata nel 63% delle dighe; seguono la pozzolana naturale nel 12,9%, la loppa d'altoforno nel 4,1%, la pozzolana artificiale (argilla calcinata) nell'1,5%, le ceneri volanti ad alto contenuto di calce nell'1,1%; inoltre nel 2,6% dei casi si sono impiegate direttamente miscele di pozzolane

senza far uso di cemento. Il termine di “materiale legante” (in inglese *cementitious material*) che si usa per indicare complessivamente il contenuto di cemento e di cenere (o altro materiale pozzolanico) non è del tutto proprio, perché del materiale aggiunto al cemento riesce ad esplicitare l'attività pozzolanica soltanto quell'aliquota che corrisponde al rapporto stechiometrico tra gli ossidi attivi del materiale stesso e l'idrossido di calcio derivante dall'idratazione del cemento: questa quantità corrisponde a valori del rapporto in peso cenere/cemento di 0,3 circa e quindi a un rapporto cenere/leganti totali di 0,23. Poiché la quantità di materiale pozzolanico impiegato è di regola molto superiore, l'eccesso esplica benefiche funzioni di filler, riempiendo i vuoti e svolgendo un'azione lubrificante fra i grani dell'aggregato e un'azione disperdente fra i granuli di cemento, che rende la pasta idratata più omogenea e uniforme.

Nell'evoluzione della tecnologia RCC si è passati ben presto dai calcestruzzi “poveri in pasta” a quelli “a medio contenuto di pasta” e a quelli “ricchi in pasta”, nei quali il dosaggio complessivo di leganti è rispettivamente inferiore a 100 kg/m³, compreso fra 100 e 150 e superiore ai 150. Le prime dighe realizzate con tali tre modalità sono state rispettivamente quelle di Willow Creek in USA (1982), di Shimajigawa in Giappone (1980) e di Castilblanco de los Arroyos in Spagna (1985). Nella media delle dighe finora costruite, il dosaggio di cemento nei tre tipi di calcestruzzo è di 69, 72 e 91 kg/m³ rispettivamente, quello dei leganti aggiunti di 11, 44 e 103 kg/m³ e il rapporto cenere/ leganti totali di 0,14, 0,38 e 0,53. Il massimo dosaggio di leganti aggiuntivi è stato quello della diga greca di Platonovryssi (1987), con 225 kg/m³ di ceneri volanti ad alto contenuto di calce a fronte di 50 kg/m³ di cemento (rapporto cenere/leganti totali 0,82).

Per garantire una sufficiente impermeabilità al corpo murario non basta che sia elevata l'impermeabilità del calcestruzzo, ma occorre soprattutto che siano a perfetta tenuta le riprese di getto fra uno strato e l'altro, le quali con la tecnica costruttiva dell'RCC si susseguono di regola a circa 30 cm di dislivello l'una dall'altra (nel 64% delle dighe esistenti fra 26 e 35 cm) e sono perciò numerosissime. I risultati più sicuri si ottengono nei “giunti caldi”, nei quali ogni strato viene ricoperto dal sovrastante prima che la presa sia troppo avanzata, cioè in un lasso di tempo di regola non superiore alle 24 ore o meglio alle 12 ore, talché non si richiedono particolari trattamenti per assicurare il perfetto contatto e la compenetrazione in seguito alla compattazione operata dai rulli vibranti. Quando l'intervallo di ripresa si prolunga, vuoi per motivi prevedibili e programmabili legati all'operatività del cantiere (per esempio alla movimentazione dei casseri), vuoi per cause accidentali imprevedibili, insorge un “giunto freddo”, in cui il ricoprimento ha luogo su uno strato già in condizioni di presa avanzata, il che richiede di trattare la superficie di ripresa con impegnative operazioni di pulizia, scarificazione e bedding di malta. La ripresa di un giunto freddo implica un allungamento dei tempi di esecuzione e - cosa più grave - dà risultati meno sicuri di quella di un giunto caldo, soprattutto nei riguardi dell'impermeabilità, perché, anche se eseguita a regola d'arte, a presa avvenuta costituisce pur sempre una discontinuità in seno all'ammasso murario e un piano di filtrazione preferenziale. Di qui la generale tendenza a ridurre il più possibile il numero di giunti freddi programmati e soprattutto ad accelerare le operazioni di getto, onde ridurre al massimo il rischio di giunti freddi indesiderati. A questo scopo sono state introdotte tre nuove tecnologie molto efficienti: nastri trasportatori del calcestruzzo ad alta velocità, aventi capacità di trasporto elevata senza pericoli di segregazione della miscela; veloci camion aspiratori per la pulizia e il prosciugamento della superficie dei giunti caldi; casseri rampanti che consentono l'avanzamento verticale continuo dei getti di RCC. Questi casseri sono stati sviluppati a partire dal 1990 in Honduras (diga di Conception), Spagna (dighe di Cenza e Atance) e Cile (diga di Pangué) e hanno raggiunto la configurazione più perfezionata nel 2000 alla diga di Beni Haroun in Algeria, che con 1.650.000 m³ di getti è oggi la più grande del mondo in RCC.

Nel 57% delle dighe in RCC esistenti è stato realizzato lungo il paramento di monte un manto di calcestruzzo tradizionale vibrato con vibratorii a immersione, allo scopo di assicurare l'impermeabilità dello sbarramento, oltre che l'estetica e la durabilità della faccia a vista. Ma con i recenti perfezionamenti delle procedure di getto si è fatta strada la convinzione che il manto in vibrato non solo non portasse più il beneficio di impermeabilizzare il corpo dell'RCC, dal momento che questo – se correttamente eseguito – è già di per sé sufficientemente impermeabile, ma rappresentasse semmai un fattore negativo, perché le operazioni necessarie alla sua posa e alla sua vibrazione interferiscono inevitabilmente con quelle contemporanee dell'RCC, rallentandole e conseguentemente peggiorando la qualità dei giunti caldi. Un significativo esempio del recente affermarsi di questa tendenza è offerto dall'evoluzione delle tecniche costruttive in Cina, il Paese che possiede il maggior numero di dighe in RCC e nel quale fino a non molti anni fa le dighe ricche in pasta venivano dotate a monte di manti di calcestruzzo vibrato spessi da 1,50 a 3 m, mentre oggi si provvede soltanto a migliorare l'estetica del paramento di monte sottoponendo a vibrazione per immersione un'opportuna zona dell'RCC adiacente al cassero. Questa procedura è stata resa possibile dall'introduzione di una nuova tecnica denominata EGVC, cioè *Enriched Groutable Vibratable Concrete*, consistente nello stendere, in adiacenza al cassero, uno spessore di malta sulla superficie dello strato appena gettato: grazie a questo arricchimento la zona di calcestruzzo interessata può essere vibrata con i vibratorii ad immersione. Soltanto nel 7.8% delle dighe in RCC esistenti l'impermeabilità del paramento di monte è assicurata con l'applicazione di membrane, in vista o protette da pannelli prefabbricati.

Nel 48% delle dighe in RCC esistenti anche il paramento di valle è dotato di manto in calcestruzzo tradizionale vibrato, ma anche questo provvedimento tende ormai a essere abbandonato, tanto che nel 35% dei casi l'RCC è stato lasciato in vista. Spesso (45% dei casi) il paramento di valle con RCC a vista è sagomato a gradoni.

Fa eccezione la scuola giapponese, giacché tutte le 42 dighe in RCC realizzate in Giappone presentano manti in calcestruzzo tradizionale vibrato su ambedue i paramenti.

Un'innovazione nella tecnologia dell'RCC che sta prendendo piede è la realizzazione di dighe a gravità in misto cementato (*Hard-Fill*), particolarmente adatte in zone sismiche e su fondazioni di bassa capacità portante. Sono realizzate con conglomerati a bassissimo contenuto in pasta confezionati con inerti prelevati dagli scavi e dalle alluvioni d'alveo e praticamente non classificati. Per uniformare e ridurre il carico sulle fondazioni e per evitare le trazioni derivanti dalle sollecitazioni sismiche, si attribuiscono a queste opere sezioni trasversali trapezie simmetriche, anziché triangolari, simili a quelle delle dighe in materiali sciolti. I paramenti sono in calcestruzzo vibrato e nel caso del paramento di monte anche armato. Di questo tipo sono state realizzate due modeste opere in Grecia (Marathia, alta 28 m, e Ano Mera, alta 32), una nella Repubblica Dominicana (Monción, alta 20 m) e una in Giappone (Nagashima, alta 33 m), mentre un'opera di grandi dimensioni è in costruzione in Turchia (diga di Cindere, alta 107 m e con 1.500.000 m³ di getti di RCC); in quest'ultima il paramento di monte sarà munito anche di una membrana impermeabile.

In Italia l'unica diga in RCC (non contando quelle pionieristiche di Alpe Gera e di Quaira della Miniera) è quella in costruzione di Sa Stria sul Rio di Monti Nieddu nella Sardegna meridionale, che avrà un'altezza di 87 m e un volume di RCC di 382.000 m³.

Politecnico di Milano
e-mail: cosfasso@tin.it

Fessurazioni di origine termica nelle dighe in calcestruzzo e relativi provvedimenti

Le fessurazioni

L'intervento si riferisce a dighe in calcestruzzo gettate per elementi (o conci) separati da giunti: nel caso di dighe a gravità il comportamento è per elementi indipendenti, mentre per le dighe dei tipi ad arco i conci sono collaboranti.

Le dimensioni dei conci sono determinanti per l'argomento in questione (alcuni esempi); rilevante è soprattutto lunghezza monte - valle dei conci delle dighe a gravità, che, come primo orientamento, quando supera i 25 - 30 m. può dar luogo a rischio di fessurazione.

Il fenomeno è ben noto da tempo; suscitavano tuttavia un certo allarmismo le segnalazioni di fessure riguardanti alcuni elementi di dighe alleggerite, in genere con una fessura verticale trasversale destra - sinistra che parte dalla fondazione e che interessa l'elemento per circa un $\frac{1}{4}$ della sua altezza. In qualche caso, in presenza di elementi più lunghi, si sono manifestate due fessure trasversali parallele, distanti tra loro circa 15-20 m.

Anche le dighe massicce sono soggette alla formazione di fessurazioni di questo tipo, ma che in genere sono meno visibili che nelle dighe alleggerite.

E' importante rilevare che tutte le fessure in esame partono dal contatto tra calcestruzzo e roccia di fondazione, o getti precedentemente induriti, che evidentemente giocano un ruolo determinante agli effetti della fessurazione, esercitando un vincolo di base.

Le cause

Il fenomeno presenta caratteristiche assai varie, dipendenti da molteplici fattori. Le fessure sono indubbiamente di origine termica: ne è causa il calore di idratazione del cemento che provoca un sensibile innalzamento di temperatura del calcestruzzo a seguito della posa in opera. Assai meno rilevante è l'azione del ritiro igrometrico, che nel calcestruzzo di massa si manifesta soltanto negli strati corticali per evaporazione dell'acqua di idratazione.

Le principali variabili in gioco sono: calore di idratazione del cemento; dosaggio di cemento nel calcestruzzo; temperatura del calcestruzzo al momento del getto; smaltimento del calore a seconda della tipologia della struttura e della sequenza dei getti; variazioni termiche dell'ambiente esterno.

Nei calcestruzzi delle dighe il calore di idratazione può provocare incrementi termici di 20°-25° C; in climi caldi, sommandosi alla temperatura del calcestruzzo al momento del getto, si possono raggiungere temperature di 40°-50° C ed oltre. I successivi abbassamenti della temperatura ambiente portano a stress termici con forte rischio di fessurazione.

Nei primi giorni dopo il getto, la dilatazione causata dal calore di idratazione del calcestruzzo ancora plastico viene facilmente assorbita dalla struttura.

Inoltre sovrapponendo più levate successive, l'abbassamento della temperatura del calcestruzzo è più graduale e ciò diminuisce il rischio di fessurazione

Va notato che questo rischio esiste anche per dighe in climi freddi (per esempio in Italia: zona alpina ad alta quota): in estate il calore di idratazione può portare il calcestruzzo a 30°-35°, ma col sopraggiungere dell'inverno il brusco abbassamento della temperatura fino a diversi °C sotto zero crea egualmente un gradiente termico tale da costituire rischio di fessurazione.

Concludendo: è determinante per la formazione delle fessure anzitutto la lunghezza monte - valle dell'elemento; poi la temperatura iniziale del calcestruzzo al momento del getto, in relazione alle variazioni stagionali di temperatura: il rischio di fessurazione

insorge quando, in presenza di un forte vincolo di base, si manifesta un sensibile gradiente termico tra la temperatura del calcestruzzo ormai stagionato e la temperatura dell'ambiente,

I provvedimenti preventivi

- a) Interventi strutturali: sono costituiti da giunti di costruzione opportunamente disposti per parzializzare la lunghezza monte – valle della superficie di getto.
- b) Accurato studio delle sequenze e delle interruzioni di getto, in relazione alle condizioni climatiche, con particolare riguardo alle eventuali sospensioni invernali
- c) Interruzione dei getti nelle ore più calde della giornata (nel periodo estivo)
- d) Riduzione del calore di idratazione, mediante l'uso di cementi a basso calore, possibilmente con riduzione del dosaggio di cemento
- e) Preraffreddamento del calcestruzzo che si può ottenere: preraffreddando gli inerti preraffreddando l'acqua d'impasto; usando una graniglia di ghiaccio trito, mescolata all'acqua d'impasto.

Gli interventi successivi

La distribuzione delle tensioni nel concio parzialmente fessurato ricalca la distribuzione nell'elemento integro perché le fessure risultano compresse, assicurando così la trasmissione delle tensioni. Non essendo compromessa la continuità della struttura, non sono necessari, in genere, interventi o rinforzi per assicurare la stabilità dell'opera; iniezioni di cemento o di resine hanno dubbia efficacia per l'esiguo spessore delle fessure.

Le fessurazioni vanno comunque monitorate per assicurarsi che non subiscano variazioni successive, dovute ad azioni termiche dell'ambiente, o ad eventuali scosse sismiche.

Un caso recente

Viene presentato il caso di una diga, che durante la costruzione aveva manifestato fessure di questo tipo sui tre elementi di maggiore altezza a causa di un'interruzione dei getti con uno spessore di pochi metri dalla roccia di fondazione: si noti che l'elemento con il maggiore spessore di calcestruzzo si era fessurato assai più tardi degli altri due.

Si sono adottati i provvedimenti (a-b.c.d.e) sopra elencati; in particolare il preraffreddamento è stato ottenuto con acqua di impasto preraffreddata, che nelle ore diurne di interruzione dei getti veniva utilizzata per preraffreddare gli inerti.

Ripresi i getti dopo una lunga sospensione, previo inserimento di armatura metallica per evitare il propagarsi delle fessure nei nuovi strati di calcestruzzo e l'iniezione con resine delle fessure esistenti a scopo cautelativo, si è potuto completare rapidamente la costruzione del tutto esente da fessurazioni, senza ulteriori inconvenienti.

Enel-CRIS
e-mail: paobert@iol.it

Recenti sviluppi nella tecnologia delle casseforme per dighe in calcestruzzo

Negli ultimi decenni, il progresso delle tecnologie produttive nel settore delle costruzioni ha dato un sostanziale contributo alla razionalizzazione dei procedimenti costruttivi, un aumento dello standard qualitativo delle costruzioni, una riduzione dei tempi di esecuzione ed un miglioramento dell'ambiente di lavoro e della sicurezza.

Il settore delle attrezzature provvisionali per getti in calcestruzzo è stato tra i maggiori protagonisti di questo progresso tecnologico.

Nel campo delle dighe in calcestruzzo, la conoscenza e il corretto impiego di cassaforme 'evolute' sono requisiti fondamentali ai fini dell'ottimizzazione del processo costruttivo.

La cassaforma a ripresa per diga appartiene alla tipologia di attrezzature provvisionali che assolve ai seguenti compiti:

- trasferire le azioni dovute alla pressione del calcestruzzo fresco alla parte di struttura già indurita, garantendo la rispondenza a progetto della geometria della superficie della struttura;
- garantire che l'effettuazione delle operazioni di armo, disarmo e movimentazione delle attrezzature si svolga nel pieno rispetto dei requisiti di sicurezza dei lavoratori;
- consentire l'esecuzione delle operazioni di armo, disarmo e movimentazione in tempi compatibili con i requisiti del processo costruttivo, con particolare riferimento all'intervallo tra getti successivi.

Dal punto di vista strutturale, l'ottimizzazione della cassaforma a ripresa è legata alla conoscenza delle proprietà del calcestruzzo fresco e indurito, in particolare:

- azione del calcestruzzo fresco in termini di pressione esercitata sul paramento durante il getto;
- proprietà meccaniche del calcestruzzo indurito in funzione del tempo, ai fini della verifica di compatibilità strutturale degli ancoraggi del sistema di ripresa.

I due aspetti sono egualmente importanti, il primo per definire le azioni sollecitanti, il secondo per determinare la resistenza della struttura provvisoria.

Negli ultimi anni, l'avvento della tecnologia del calcestruzzo rullato (RCC) ha rappresentato una nuova sfida strutturale e tecnologica per il settore delle casseforme. Rispetto alle dighe con getti in calcestruzzo normale, le dighe in RCC sono caratterizzate da:

- maggiore estensione orizzontale della fase di getto; di conseguenza il livello prestazionale delle attrezzature in termini di tempi di armo, disarmo e movimentazione aumenta la sua importanza nell'ambito dell'ottimizzazione del processo costruttivo;
- riduzione dell'intervallo tra le fasi di getto, al fine di garantire giunti 'caldi' tra getti successivi, con conseguente riduzione dei tempi di maturazione del calcestruzzo indurito in corrispondenza degli ancoraggi del sistema di ripresa

Lo sviluppo di un sistema di ripresa innovativo ha consentito di ovviare ai requisiti più stringenti conseguenti all'impiego di RCC.

Rispetto ai procedimenti costruttivi tradizionali, il metodo impiegato per dighe in RCC prevede che, all'atto del disarmo e spostamento in fase successiva della cassaforma a ripresa, la parte superiore dei moduli di cassaforma rimanga in posizione di armo, in attesa che il calcestruzzo raggiunga la necessaria maturazione. Ciò consente di ridurre i tempi tra le riprese di getto, rendendoli compatibili con i requisiti dettati dalla tecnologia del calcestruzzo rullato.

Gli obiettivi raggiunti con la realizzazione di alcune grandi dighe nel mondo

In una stagione che mette in discussione l'idea stessa di realizzare altre dighe serve certamente ricordare gli obiettivi raggiunti con la realizzazione di alcune delle più grandi dighe costruite nel mondo recentemente.

Inutile ricordare che la risorsa acqua dolce scorre per circa il 70 % nei fiumi e in molto minor proporzione in falde facilmente utilizzabili. Inutile ricordare che la ciclicità delle stagioni e delle precipitazioni lascia poco spazio ad opzioni diverse dalla cattura e dall'accumulo delle acque dolci superficiali, scorrenti nei periodi di morbida, acque che vanno altrimenti inevitabilmente perdute ai fini di un utilizzo umano.

Se le dighe sono necessarie, e lo saranno vieppiù nel medio termine, non va dimenticato che esse sono generalmente viste prevalentemente sotto l'angolazione riduttiva del semplice accumulo di acqua e della conseguente sottrazione di risorse idriche a valle e sottrazione di risorse di territorio nell'invaso.

Si tende spesso a ignorare, o almeno a sottovalutare, tutta una serie di risultati, diversi dall'accumulo di acqua e dal consumo di territorio, cercati e conseguiti da progetti al cui centro stanno dighe di varie dimensioni.

Ho avuto la fortuna di partecipare ad alcuni grandi progetti nel mondo ed è di questi, che vorrei parlare. Non serve dire che il tema è tutt'altro che esaurito e che, anzi, la maggior parte delle realizzazioni degne di essere menzionate in questa ottica, resta da ricordare.

Voglio iniziare da una diga terminata di recente nell'isola di Luzon, nell'Asia Pacifica. Ho sviluppato il progetto di **SAN ROQUE** nei primi anni 80. Il progetto venne iniziato solo nel 1998 e completato nel 2002.

La riserva d'acqua creata dalla diga consente oggi di irrigare 67 000 ha che danno 3 raccolti di riso all'anno. Non solo si è creata una disponibilità di risorse irrigue ma il grande volume del serbatoio (1000 milioni di m³) permette una accettabile diluizione degli inquinanti scaricati da varie miniere d'oro, inquinanti che fino ad oggi avevano sterilizzato la pianura sottostante. Luzon è sul percorso della maggioranza dei tifoni pacifici e nel bacino imbrifero della diga si verificano le precipitazioni più intense del globo (oltre 400 mm/h) e quindi le piene più repentine e catastrofiche. La grande capacità specifica del serbatoio alle quote alte (15 milioni di m³/m di vaso) abbassa drasticamente la probabilità di una piena catastrofica a valle.

Il progetto delle **3 GOLE** (San Xia alla cinese) è fin troppo noto. Meno note sono le ragioni che hanno sostenuto lo sforzo incredibile necessario per realizzarlo. Ho partecipato alla progettazione delle opere di deviazione dello Yangtze (Jing Jiang in cinese).

Lo Yangtze è noto per le alluvioni che con frequenza meno che decennale devastano la pianura cinese che, oltre ad essere il vero granaio del paese è abitata da quasi 350 milioni di persone. La piena del 1975 è rimasta tristemente impressa in tutti i cinesi: pare che 30 000 persone siano rimaste vittime della inondazione.

L'obiettivo principale che ha spinto alla realizzazione del progetto delle 3 Gole è appunto aumentare il tempo di ritorno di una piena catastrofica da 10 a 100 anni. La seconda finalità è stata rendere possibile una facile navigazione del settore più pericoloso del fiume e, con 2 serie di conche di navigazione gemellate, aprire a battelli oceanici (10 000 t di dislocamento) una via d'acqua che raggiunge i contrafforti del Tibet. Non ultimo la potenza installata sarà di ben 18 700 MW.

La Cina ci offre un altro esempio interessante: la diga di **XIAOLANGDI** sul fiume Giallo che ho seguito come responsabile della sicurezza dal 1996.

Il fiume Giallo scorre per oltre 1 000 km attraverso ai fantastici depositi di loess della Cina settentrionale e si carica di incredibili quantità di sedimenti (anche 350 kg/m³ d'acqua). Nella parte finale del suo corso la sedimentazione è fortissima e l'accrescimento del fondo del fiume è di circa 0.1 m/anno. La diga di Xiaolangdi è stata concepita per risolvere per alcuni decenni questo angosciante problema.

Un progetto che fin dall'inizio ha avuto una sola finalità: quella della generazione di energia idroelettrica: **ITAIPU** sul Paranà. A tutt'oggi il più grande blocco di generazione pulita e rinnovabile disponibile (14 400 MW).

Tutta l'energia prodotta è trasferita a Sao Paulo con linee di 800 km a 600 e 750 kV in corrente continua (con 1 solo conduttore).

Per chiudere, in Africa si è accarezzato per anni la speranza di realizzare lo sbarramento integrale dello Zaire (ex Congo). Progettammo la diga della **GRANDE INGA** utilizzando le esperienze fatte con la deviazione e lo sbarramento del Paranà.

Si tratta di una non-diga perché non è stata realizzata e perché l'opera coincide sostanzialmente con la struttura di deviazione del fiume.

A Inga è disponibile il più grande blocco di energia pulita e rinnovabile del pianeta. La potenza installabile é 40 000 MW cui si possono aggiungere altri 40 000 MW installabili negli impianti di Pioka a monte e di Matadi a valle. Le 3 dighe consentirebbero di realizzare una via navigabile che collega l'Atlantico alla Stanley Pool, a Kingshasa, a monte della quale tutto l'alto Zaire è navigabile per oltre 1 000 km.

Un blocco di energia di queste dimensioni, se utilizzato per la produzione di idrogeno, potrebbe fornire energia pulita a mezza Europa.

Sembenelli Consulting
e-mail: scsem@iol.it

Ottimizzazione dei calcestruzzi per la realizzazione della diga delle Tre Gole in Cina

Il progetto denominato delle Tre Gole sullo Yangtze, in Cina, è un progetto multidisciplinare che prevede benefici nell'ambito sia della limitazione delle inondazioni del fiume e della generazione di energia che nella navigazione, oltre ai benefici derivanti dallo sfruttamento del fiume grazie alla piscicoltura nonché ad una generale e drastica riduzione dell'inquinamento ambientale. Il progetto include la costruzione della Diga delle Tre Gole sullo Yangtze, il fiume più lungo della Cina e il terzo più grande al mondo.

Lo Yangtze nasce dai ghiacciai della piattaforma tibetana da cui raggiunge, dopo aver percorso 6300 km, l'Oceano Pacifico. Il quantitativo di acqua portato fino al mare è circa 1000 miliardi m³; il dislivello totale superato dal fiume è di circa 5800 m, quindi, con un potenziale di generazione dell'energia dal punto di vista idroelettrico di circa 268 milioni di KW.

Da Fengjie a Yichang lo Yangtze attraversa le tre gole Qutang, Wuxia e Xiling da cui il progetto prende il nome. La Diga delle Tre Gole, in particolare, è situata nella gola di Xiling, dove esistono le condizioni naturali ottimali per la realizzazione di questa grande opera, rappresentate da un largo bacino, da un letto del fiume costituito da un ammasso di roccia granitica, da una portata annua di circa 500 miliardi di m³ e da un vasto lago di circa 1 milione km² che a lavori ultimati costituirà il più grande progetto dell'ingegneria civile al mondo mai realizzata dall'uomo.

La diga a gravità, di lunghezza 3035 m e di altezza pari a 185 m, verrà completata nel 2006. Nella parte superiore della diga verrà realizzato un lago che sarà lungo più di 600 km ed avrà una profondità di 175 m, quindi con una capacità di circa 39.3 miliardi di m³ di acqua. La capacità di scarica dello sfioratore, che costituisce la parte centrale della diga, sarà di circa 110000 m³ di acqua per secondo e i due impianti di generazione dell'energia, che sono situati sui due lati dello sfioratore, avranno una capacità totale di circa 85 miliardi di KW ore all'anno.

Si prevede che solcheranno le acque del fiume merci per 50 milioni di tonnellate all'anno. Le strutture che consentiranno alle navi di superare lo sbarramento rappresentato dalla diga includono un ascensore verticale di dimensioni in pianta 120 m x 18 m che sarà destinato ad imbarcazioni fino a 3000 t di peso e da una chiusa che, invece, servirà per le navi con un cabotaggio fino a 10000 t.

Il quantitativo totale di calcestruzzo che verrà utilizzato per la realizzazione di tutte le infrastrutture è di circa 27 milioni di m³, di cui 350000 m³ sono stati utilizzati per lo sfioratore centrale.

Una serie di test ed analisi sono stati condotti al fine di ottimizzare la composizione del calcestruzzo destinato alla realizzazione dello sfioratore per ottenere un conglomerato ad alta resistenza e con un'elevata capacità di resistere all'erosione.

Il principale obiettivo della ricerca condotta fu quello di scegliere l'additivo superfluidificante più efficace, sia nei riguardi della riduzione dell'acqua d'impasto, che nel mantenimento della lavorabilità, capace di conseguire sia le caratteristiche reologiche che quelle meccaniche richieste per il calcestruzzo minimizzando il contenuto di legante nell'impasto.

Sono stati condotti una serie di test, sia di laboratorio che di campo, i quali hanno evidenziato come l'additivo acrilico possiede prestazioni decisamente superiori rispetto ai tradizionali superfluidificanti a base naftalinica. E' stata, inoltre, valutata la capacità del superfluidificante di ritardare il processo di idratazione.

La superiorità in termini di prestazioni sia reologiche che fisico-meccaniche del calcestruzzo confezionato con l'additivo acrilico rispetto a quello basato sul impiego del neftalensofonato è stata confermata, inoltre, dai risultati delle prove condotte nell'impianto di betonaggio. I dati in termini di ritiro idraulico ottenuti dai campioni confezionati all'impianto di betonaggio mostrano che il ritiro del calcestruzzo confezionato con l'additivo acrilico è stato più basso di circa il 39-44 % rispetto a quelli ottenuti per il tradizionale calcestruzzo confezionato con l'additivo a base di naftalina solfonata.

Al fine di controllare la temperatura nel "cuore" della diga sono state utilizzate delle termocoppie, le quali furono annegate sia nelle zone dello sfioratore realizzate con il calcestruzzo contenente l'additivo acrilico che in quelle realizzate con il conglomerato additivato con l'additivo naftalinico. La temperatura nel "cuore" della struttura in calcestruzzo con l'additivo acrilico è di circa 5-7°C più bassa, durante le prime 48 ore, grazie alla riduzione del legante (circa 47 kg/m³) conseguente all'impiego dell'additivo superfluidificante acrilico. Inoltre, quando nel primo periodo di realizzazione della diga venne impiegato il calcestruzzo con l'additivo naftalinico l'incremento di temperatura fu di circa 46°C e molte fessure vennero registrate sulla superficie del getto. Dall'ottobre 2002, da quando cioè viene utilizzato il calcestruzzo additivato con l'additivo acrilico, questo quadro fessurativo si è ridotto di circa l'83 %.

*MAPEI S.p.A. - Milano
e-mail: l_coppola@mapei.it*

Dal progetto alla costruzione: difficoltà e distorsioni

Oggi la progettazione di una grande opera, quale una diga di ritenuta, viene sviluppata sulla base di indagini conoscitive ampie e dettagliate, supportate da analisi numeriche globali e di dettaglio, che consentono una sintesi progettuale incomparabilmente più avanzata rispetto al passato. Quel passato in cui è stato realizzato il maggior numero delle dighe oggi in esercizio.

La realizzazione di nuove opere di sbarramento rappresenta oggi, nella globalità del mercato delle costruzioni, una nicchia. Questa situazione fa sì che le imprese di costruzione siano generalmente sempre meno “specializzate” in questa tipologia di opere, come maestranze e come attrezzature.

Di qui l’incremento del divario fra la fase progettuale e quella costruttiva. Attori della gestione di questa distonia sono il Direttore del Cantiere da un lato, il Direttore dei Lavori dall’altro.

Il primo è soprattutto impegnato a gestire un contratto, chiuso a condizioni economiche generalmente difficili, da svolgere con maestranze di ridotta esperienza specifica.

Il secondo, assorbito da laboriosissime attività amministrative, deve gestire il controllo della qualità esecutiva con scarsi mezzi e poche armi per conseguire il concreto rispetto.

Sembra indispensabile per questa tipologia di opere, una limitazione ai ribassi offerti in fase di gara, da riportare agli importi progettuali, e che il finanziamento per la realizzazione preveda un congruo importo per le operazioni di Direzione dei Lavori si da consentire attività di istruzione, di controllo continuo e puntuale, di verifica con prove specifiche...

Solo la somma dei due provvedimenti potrà consentire di raggiungere nell’ambito contrattuale il miglior risultato qualitativo.

Ing. C. Marcello Srl
e-mail: studio.marcello@iol.it

Il rischio idraulico a valle delle dighe italiane

In Italia sono attualmente in esercizio 552 grandi dighe gestite e controllate dal Servizio Dighe del Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali.

Questi invasi possono svolgere un ruolo importante nella mitigazione delle piene, sia in termini di laminazione dell'onda di piena che di introduzione di un benefico sfasamento nel tempo tra l'onda di piena proveniente dal bacino di monte e le onde in ingresso al reticolo idrografico provenienti dai bacini posti a valle.

L'analisi della propagazione delle onde rilasciate dalle dighe costituisce uno degli strumenti di base per l'analisi del rischio idraulico e per la pianificazione territoriale a valle degli sbarramenti.

Dal punto di vista normativo, lo studio della propagazione di onde rilasciate da sbarramenti di ritenuta fu affrontato a partire dalla metà degli anni 80; due circolari (1125/86 e 352/87) del Ministero dei Lavori Pubblici imposero ai gestori delle dighe di eseguire entro il Dicembre 1992 studi per identificare le aree inondabili dalle onde generate dall'apertura istantanea degli organi di scarico e dall'ipotetico collasso degli sbarramenti di ritenuta.

Questi studi, a tutt'oggi effettuati e presentati al Servizio Dighe per oltre l'80% degli sbarramenti, furono esaminati nell'ambito di una convenzione tra il Servizio Nazionale Dighe e il CNR-GNDICI,, coinvolgendo le Università di Salerno, Pavia e Perugia, per verificarne l'accettabilità.

La circolare DSTN/2/22806 del 13/12/1995 per la prima volta ha definito i requisiti degli studi per la mappatura delle aree a rischio di inondazione conseguente a manovre degli organi di scarico o ad ipotetico collasso delle dighe. Questi criteri, fissati sulla base dell'esperienza maturata nell'analisi degli studi presentati, riguardano: la descrizione della diga, le ipotesi di manovra e di cedimento, la valutazione delle portate effluenti, la presenza di eventuali dighe in serie, le caratteristiche dei rilievi topografici della valle, la simulazione propagazione dell'onda di piena con eventuale simulazione delle modifiche d'alveo, la delimitazione del tratto fluviale oggetto del calcolo, la rappresentazione dei risultati.

Dall'esame degli studi presentati emerge che le richieste di aggiornamento riguardano, più che gli aspetti modellistici e numerici, principalmente la qualità delle informazioni acquisite e in particolare le informazioni topografiche e il supporto cartografico per la rappresentazione dei risultati.

In sintesi, quindi, la relazione si articolerà nei seguenti punti:

- a. presentazione della normativa italiana, anche in confronto con le esperienze di altri paesi europei, riguardante l'analisi del rischio idraulico a valle delle dighe,
- b. analisi e sintesi dei risultati degli studi di propagazione finora presentati al Servizio Nazionale Dighe,
- c. problemi tutt'oggi ancora aperti dal punto di vista scientifico, con particolare riferimento alla modellistica matematica e numerica della propagazione delle onde di piena, alla caratterizzazione della topografia della valle (sezioni trasversali e modelli digitali del terreno), alla perimetrazione delle aree inondabili, alla definizione degli scenari di collasso dello sbarramento.

*Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
e-mail: lucio.ubertini@uniroma1.it*

La sicurezza idrologica nei bacini regolati dalle dighe

Oltre un secolo di esperienza nella costruzione e gestione di sistemi di accumulazione idrica e di laminazione delle piene mostra come le piene “eccezionali” costituiscano una importante fonte di rischio non soltanto per la sicurezza del manufatto, ma anche e soprattutto per quella delle zone riparie a valle dei sistemi di regolazione. Tale considerazione è supportata dai dati statistici: per esempio, a scala mondiale, il sormonto di dighe ha prodotto più del 40% delle rotture, causando anche numerosi altri incidenti di minore importanza. Uno recente studio dell’ASCE ha messo in evidenza come il 3% delle dighe degli Stati Uniti siano soggette a rischio per inadeguatezza degli organi di scarico. Per questo motivo, la scelta della piena di progetto è vista con costante preoccupazione dall’ingegneria degli sbarramenti, preoccupazione ancor più rilevante nel caso degli sbarramenti dedicati proprio alla laminazione delle piene.

I criteri e i metodi per la progettazione idrologica e la valutazione della piena di progetto si sono notevolmente evoluti nel corso di questo secolo. I criteri e i metodi di “prima generazione” trascuravano generalmente l’importanza e la dimensione del manufatto, il volume invasabile e l’effetto di laminazione e, soprattutto, il rischio vallivo in caso di rottura. In questo contesto, si sono sviluppate nel mondo due impostazioni abbastanza diverse, sia per ragioni scientifiche e tecniche, sia, soprattutto, per motivazioni legate alla pratica professionale e alla copertura assicurativa dei rischi. Negli Stati Uniti e nei paesi soggetti alla loro influenza economica e tecnologica vengono per lo più utilizzati metodi deterministici, basati sul concetto di “Probable Maximum Flood” o PMF, mentre la maggior parte dei paesi europei impiegano metodi probabilistici, adottando elevati periodi di ritorno. L’analisi comparativa di questi criteri mostra come il periodo di ritorno della piena di progetto vari in modo notevole, da 100 a 10.000 anni (ICOLD, 1979) se si includono anche i paesi dove viene adottato il PMF o sono utilizzati altri metodi deterministici (ICOLD, 1988).

Nel ridefinire i diversi metodi di valutazione della piena di progetto, i criteri di “seconda generazione” attualmente in uso in molti paesi hanno introdotto una classificazione degli sbarramenti essenzialmente basata sul rischio cui vanno soggetti gli abitati di valle in relazione a una potenziale rottura (Rosso 1999). L’applicazione di questi criteri è iniziata nella seconda metà degli anni ottanta, introducendo, per esempio, una classificazione degli sbarramenti in piccole, medie e grandi, e del rischio vallivo in basso, significativo ed elevato, in relazione alla vulnerabilità delle aree vallive interessate da una potenziale rottura (ICE, 1978; USACE, 1979; ANCOLD, 1986). Anche se si registra una straordinaria varietà di impostazione nei diversi paesi, la maggior parte dei metodi attualmente in uso per la valutazione della piena di progetto integrano, nel migliore dei casi, gli elementi caratteristici dell’opera con l’assetto idrologico e idraulico delle aree riparie di valle. Al contrario, sono considerati in modo affatto marginale altri fattori di una certa importanza, quali l’affidabilità dei dati meteorologici e idrologici di base, la tipologia degli sfioratori, il franco, l’effetto di laminazione dell’invaso, e la presenza di sistemi di laminazione a monte e a valle dell’opera in esame.

I criteri di “terza generazione” dovrebbero tenere maggiormente in conto proprio di questi fattori nel quadro di una valutazione globale di affidabilità del sistema fluviale. Negli ultimi anni i progressi negli studi idrologici e idraulici hanno migliorato in modo notevole la capacità di prevedere e modellare i processi naturali e le loro interazioni con le opere dell’uomo, indicando nuove tendenze nell’analisi dei fenomeni di piena. Inoltre l’enorme mole di dati (livelli idrici e manovre agli organi di scarico) registrati in corrispondenza

⁵in collaborazione con Carlo De Michele (Politecnico di Milano), Alberto Petaccia (Registro Italiano Dighe)

degli sbarramenti costituisce un patrimonio storico-documentale prezioso per la verifica delle portate di progetto e, più in generale, degli scenari idrologici di progetto. Tali informazioni possono essere utilizzate per meglio definire i concetti di “periodo di ritorno di progetto”, di “piena di progetto” e di “idrogramma di progetto” per i calcoli idraulici degli sfioratori e dei dissipatori di energia, e di “piena di controllo della sicurezza”, con la quale rappresentare la condizione estrema di sollecitazione idrologica sopportabile dell’opera senza incorrere in una situazione di crisi irreversibile della struttura.

In questo contesto, il problema della sicurezza dei bacini regolati dalle dighe ed in particolare la verifica dell’adeguatezza degli organi di scarico di superficie della diga va oggi considerato con particolare attenzione, non solo per la revisione e la manutenzione delle dighe attualmente in esercizio, ma per identificare anche le regole ottimali di gestione, oggi diverse da quelle che potevano esser valide al tempo della loro costruzione, per via delle diverse necessità odierne di mitigazione del rischio vallivo. L’analisi probabilistica congiunta della portata e del volume di piena consente di identificare in maniera corretta i valori di progetto in ragione del rischio associato al loro superamento, nonché il corrispondente idrogramma di progetto. A tal fine, l’impiego del concetto di copula è in grado di fornire uno strumento matematico di notevole efficacia. Viene illustrata un’applicazione di tale metodologia alla diga Ceppo Morelli in Piemonte.

Politecnico di Milano
e-mail: renzo.rosso@polimi.it

Sicurezza e impatto ambientale

L'impatto dell'uomo sull'ambiente sta aumentando esponenzialmente a causa della crescita demografica della nostra specie (siamo mille volte più numerosi rispetto a 10.000 anni fa) e dell'incalzante sviluppo tecnologico. Le conseguenze sono difficilmente prevedibili e spesso negative, o almeno percepite come tali da un numero crescente di persone (per esempio dall'arcipelago dei "verdi").

La soluzione dei molti e gravi problemi ambientali non va ricercata nell'arresto dello sviluppo tecnologico, come sostenuto da molti ecologisti, ma al contrario in un ulteriore accelerato sviluppo delle conoscenze scientifiche e tecnologiche, unito a un approccio fortemente interdisciplinare. Approcci settoriali hanno, infatti, non di rado conseguenze inattese e talora drammatiche. Per esempio il recente tentativo di sviluppare l'agricoltura nell'Africa sub-sahariana ha causato un forte aumento della frequenza di gravi malattie tropicali come la malaria e la schistosomiasi, un esodo massiccio dalle aree rurali a quelle urbane e lo sviluppo di sterminate baraccopoli con fogne a cielo aperto e inquinamento fecale delle risorse idriche, che ha determinato a sua volta un ulteriore peggioramento delle condizioni sanitarie delle popolazioni locali. Tutto questo non si sarebbe verificato se insieme agli agronomi avessero partecipato ai piani di sviluppo ecologi, parassitologi e igienisti.

Anche la progettazione e la realizzazione delle dighe richiede un approccio integrato e multidisciplinare. Infatti, accanto agli effetti positivi di tali opere (produzione di energia, sviluppo economico, creazione di posti di lavoro, controllo delle piene dei fiumi, disponibilità permanente d'acqua per usi civili, industriali e per l'irrigazione, sviluppo della pesca, creazione di habitat favorevoli per varie specie di uccelli, ecc.) va considerata una serie di potenziali effetti negativi: l'instabilità geologica può mettere in pericolo le popolazioni che vivono in prossimità delle grandi dighe (caso del Vaiont); siti di interesse archeologico, paesistico, storico o artistico possono essere sommersi dalle acque (diga delle Tre Gole sul fiume Yangtze in Cina); nelle regioni tropicali e sub-tropicali la costruzione di dighe con creazione di bacini idrici e di sistemi di irrigazione porta spesso al massiccio sviluppo di larve di zanzare del genere *Anopheles* e di molluschi gasteropodi del genere *Bulinus*, vettori rispettivamente degli agenti patogeni della malaria e della schistosomiasi; la qualità dell'acqua può peggiorare per l'aumento della salinità, che la rende non più potabile, né utilizzabile per l'irrigazione dei campi; la decomposizione delle biomasse animali e vegetali del sistema idrico può causare, specialmente nelle regioni tropicali, aumento della concentrazione di anidride carbonica, deficit di ossigeno fino all'anossia, crisi distrofiche, sviluppo di popolazioni batteriche potenzialmente patogene, produzione di acido solfidrico ad opera di batteri anaerobi, ecc.; le migrazioni di varie specie ittiche possono essere ostacolate o impedito; la biodiversità può subire una drastica diminuzione e habitat ecologicamente importanti possono scomparire.

Poiché le grandi dighe hanno sempre un notevole impatto ambientale, è necessario che fin dal momento della loro progettazione venga realizzata una valutazione il più possibile accurata dei vari effetti positivi e negativi, prevedibili nel breve, medio e lungo periodo (*bilancio di impatto ambientale*). Tale valutazione deve essere realizzata con il concorso di studiosi delle più diverse discipline (ingegneri, geologi, paleontologi, fisici, climatologi, sismologi, chimici, biologi, ecologi, agronomi, pedologi, antropologi, zoologi, botanici, microbiologi, parassitologi, igienisti, medici, economisti, storici, archeologi, studiosi dell'arte e del patrimonio culturale, ecc.). Il processo decisionale deve, inoltre, coinvolgere tutti i soggetti interessati: progettisti, ricercatori, amministratori, organi tecnici, popolazione.

Poiché un certo numero di effetti negativi non può in genere essere evitato, è importante individuare e realizzare adeguati interventi di mitigazione. Si dovrà, inoltre, cercare di equilibrare la perdita di un dato valore ambientale ripristinandolo in una sede diversa, ma prossima. Se per esempio la costruzione di una diga sommerge un bosco, si dovrà riforestare con criteri naturalistici un'area prossima di estensione simile.

In conclusione appare sempre più necessario che l'accresciuta capacità dell'uomo di modificare l'ambiente sia bilanciata dallo sviluppo di metodologie di previsione e controllo delle conseguenze di tali modificazioni.

*Dipartimento di Genetica e Biologia molecolare
Sezione di Ecologia, Università di Roma "La Sapienza"
e-mail: luciano.bullini@uniroma1.it*

Dighe ed ambiente

Nella vasta tipologia di opere di ingegneria civile le dighe di ritenuta sono di certo quelle che maggiormente sono condizionate e condizionano l'ambiente naturale.

Ne sono condizionate per cause dirette che riguardano assieme la morfologia, la geologia, la idrologia della sezione di imposta e determinano quindi il tipo di struttura da adottare ed i relativi problemi strutturali.

E queste cause riguardano non solo l'opera finita e funzionante, ma anche il periodo transitorio di costruzione; qualche esempio esemplificativo mostra che la inosservanza di talune misure prudenziali in fase di esecuzione può essere causa di gravi danni a persone e cose.

Per cause indirette le dighe condizionano poi l'ambiente naturale per la creazione di un ampio serbatoio da cui derivano fra l'altro azioni sui versanti, sismicità indotta, problemi di qualità dell'acqua, modifiche alla idrologia a valle e quant'altro; si hanno per contro effetti benefici che assicurano la regolazione delle piene, il sollievo della siccità, la disponibilità di cospicui riserve d'acqua per usi della società civile.

Tali cause indirette hanno formato oggetto di una indagine di cui si è occupato il gruppo di lavoro "dighe ed ambiente" del Comitato Italiano Grandi Dighe che ho avuto il privilegio di coordinare ed i cui risultati sono contenuti nei bollettini 2 e 2bis del Comitato.

Ad un breve riepilogo generale di questo lavoro fanno seguito alcuni puntuali accenni a temi di maggior interesse quali i fenomeni franosi, la sismicità indotta, gli effetti sanitari.

Da quanto è stato detto risulta evidente la necessità di particolari, scrupolose indagini in sede progettuale, sia per le cause dirette quanto per quelle indirette: anche al fine di predisporre -proprio in sede progettuale- misure atte ad attenuare i previsti inconvenienti.

*Associazione Idrotecnica Italiana
e-mail: segreteria.pro@lottiassociati.com*