

Alcune esperienze nella costruzione di grandi dighe

M. BALDASSARINI *

SOMMARIO: Vengono presentate alcune esperienze di intervento in fondazione durante la costruzione delle dighe di Kariba sullo Zambesi e di Tarbela sull'Indo.

Essendo stato invitato a questo Convegno come facente parte del « panel » di esperti per le fondazioni di dighe, mi sono letto una buona parte delle relazioni presentate su quest'argomento.

Debbo confessare che, mentre ne ho capite bene un certo numero, di molte altre, cioè di quelle di carattere piuttosto teorico, ho affermato poco o nulla.

Chiarisco però subito che questa non è solo una confessione di ignoranza, ma un atto di umiltà, senza nessun'ombra di quella sufficienza che spesso coloro che si occupano di problemi esecutivi e pratici — come è il mio caso — dimostrano nei confronti della trattazione teorica degli argomenti che riguardano il nostro mestiere.

Malgrado che per più di trent'anni mi sia occupato quasi esclusivamente dei problemi pratici suddetti, sono e rimango un ingegnere, e mi è chiaro, direi anzi assiomatico, che teoria e pratica debbono completarsi a vicenda e che sono, nella sostanza, due volti del problema fondamentale che noi ingegneri dobbiamo continuamente fronteggiare e risolvere, e che è quello del successo globale, funzionale, statico ed anche ecologico delle opere di cui ci viene affidata la progettazione e l'esecuzione.

Ho ritenuto necessario questo chiarimento non tanto a beneficio dei pochi che mi conoscono, quanto dei molti per i quali sono uno sconosciuto; ho ritenuto necessario farlo come premessa al fatto che non parlerò che di problemi pratici e soltanto da un punto di vista pratico.

Credo, d'altra parte, che questo sia quello che si aspettano da me coloro che hanno invitato me, costruttore, a far parte di un « panel » costituito essenzialmente da gente che si occupa del problema dall'altra parte della barricata.

Con queste premesse, ed in questo quadro,

considero utile riferire i due casi più interessanti della mia esperienza di costruttore.

Il primo caso risale al mio primo cantiere all'estero, quello di Kariba, in Rhodesia, che ebbe inizio più di venti anni fa; il secondo si riferisce al più grande ed importante, quello di Tarbela, in Pakistan, ultimato nel settembre 1977.

La diga di Kariba è una diga in calcestruzzo, del tipo ad arco, con un volume di più di un milione di metri cubi ed un'altezza di 120 metri sul fondo, impostata in una gola rocciosa del fiume Zambesi.

In sponda sinistra, sul fondo e nei due terzi inferiori della sponda destra la roccia è uno gneiss notevolmente sano e compatto, del tutto idoneo, salvo il consueto trattamento di iniezioni, a sopportare la spinta della diga.

Nel terzo superiore della sponda destra, invece, la roccia è una quarzite molto dura, ma interessata da numerosissimi giunti, molti dei quali riempiti da argilla o da materiale micaceo incoerente.

I lavori di costruzione della diga vera e propria ebbero inizio nel 1956 e terminarono con la sua inaugurazione nel 1960, mentre l'invaso — il lago ha un volume di 160 miliardi di metri cubi — ebbe inizio subito dopo la piena del 1958, cioè due anni prima che la diga fosse finita.

I progettisti si erano resi conto fin dall'inizio dei gravi problemi di tenuta e di stabilità collegati alle caratteristiche fisiche della quarzite in sponda destra; per migliorarle avevano prescritto un trattamento speciale di « jetting » che consisteva nel provocare, mediante insufflazione alternata di acqua ed aria compressa, la comunicazione di fori adiacenti, allo scopo di scacciare la mica e l'argilla dalle fessure, per poi iniettarle, sotto pressione, con miscele di acqua, cemento e sabbia.

Questo trattamento venne eseguito molto accuratamente, con risultati tecnici che vennero considerati soddisfacenti. In alcune zone ven-

* Dr. ing. Mario BALDASSARINI.

nero iniettati fino a settecento chili di miscela per metro cubo di roccia, sostituendo un equivalente volume di materiali difettosi. Anche se l'ingegner Sembenelli dice, giustamente, che l'assorbimento non è una misura del successo, in questo caso particolare la cifra fornita ha un qualche significato, tenendo presente che, in questo caso si mirava a sostituire dei materiali non soddisfacenti con materiali più adatti.

A diga ultimata, però, e ad invaso ben avanzato, e quindi quando la diga era sotto carico, ci si accorse che il modulo di elasticità della roccia era ancora troppo basso per un soddisfacente funzionamento statico della diga.

Venne quindi deciso dai progettisti di scaricare sullo gneiss sottostante la spinta della diga agente sulla zona in quarzite della spalla.

Questo richiedeva di deflettere verso il basso la spinta, e questo scopo venne realizzato aggiungendo all'esterno un confrangente a gravità e costruendo tre diaframmi sotterranei in calcestruzzo spessi sei metri che poggiavano sullo gneiss e raggiungevano la superficie di imposta della diga.

Questo lavoro ci venne ordinato a diga ultimata ed inaugurata, ed in fase di chiusura del cantiere, quindi non certo nel momento più favorevole dal punto di vista organizzativo.

Fu un lavoro estremamente difficile e delicato, eseguito con metodi da miniera più che da galleria. Il rischio era grande se si pensa che i diaframmi erano alti una quarantina di metri e che gli scavi, richiedenti l'uso continuo di esplosivo, vennero eseguiti sotto battenti d'acqua fino a sessanta metri, mentre il lago si stava riempiendo.

Per fortuna tutto andò bene, grazie alla capacità tecnica ed alla dedizione del nostro personale ed anche, ovviamente, al fatto che la roccia era stata bene iniettata. Confesso però che tirammo tutti un sospiro di sollievo quando l'ultimo buco fu riempito di calcestruzzo.

Vengo ora all'altro caso.

Tarbela, com'è noto, è la più grande diga in terra del mondo, con un volume totale di rilevati di 140 milioni di metri cubi e con un'altezza massima sulle fondazioni di 150 metri.

La diga sbarra il letto del fiume Indo, tra due catene parallele di colline rocciose, costituite da un vero « pot-pourri » di calcari, filliti, scisti cloritici e diversi altri tipi di roccia.

Mentre le sponde, bene o male, sono rocciose, il letto del fiume è invece costituito, per la maggior parte della sua larghezza, cioè per 1750 metri su un totale di 2300, da un materasso

alluvionale con una profondità massima che supera i duecento metri.

La diga è stata appoggiata direttamente su questo materasso, in quanto non era, ovviamente, possibile fare altrimenti.

Questa soluzione ha comportato la necessità di risolvere il problema del controllo delle filtrazioni subalvee indotte dal battente del lago, non tanto per evitare perdite d'acqua dal serbatoio — questo non costituisce certamente un grave problema nel caso del fiume Indo — quanto per assicurare la stabilità idraulica della diga e delle sue fondazioni.

Data la profondità dell'alveo, l'esecuzione di diaframmi impermeabili di qualsiasi tipo fu ritenuta inattuabile dai progettisti e fu, invece, adottata la soluzione di allungare il cammino idraulico delle filtrazioni prolungando il nucleo della diga con un tappeto impermeabile in terra compattata, costituito da una ghiaia terrosa con elementi litoidi angolari, arricchita di silt per aumentarne l'impermeabilità, appoggiato sulla parte ghiaiosa del letto fluviale ed estendentesi per circa 1200 metri verso monte. Lo spessore di questo tappeto variava da circa un metro e mezzo al suo lembo di monte fino a 12 metri nel punto dove si collegava col nucleo della diga.

L'invaso venne iniziato nel luglio del 1974 e venne interrotto drammaticamente (quando il lago gravava già sul tappeto con un battente d'acqua di almeno 100 metri) a causa dei danni gravissimi che si verificarono nella galleria di deviazione N. 2 a partire dal luglio 1974 e che obbligarono ad uno svaso rapidissimo a partire dal 22 agosto 1974.

A svaso ultimato il tappeto impermeabile, tornato nuovamente visibile, appariva butterato da centinaia di crateri chiamati in inglese « sinkholes », aventi un diametro variabile da poche decine di centimetri fino ad un massimo di dodici metri. Questi crateri avevano pareti verticali, come se la pressione dell'acqua avesse punzonato un foro circolare attraverso lo spessore del manto terroso. La profondità era variabile ed il fondo era coperto dal materiale stesso del tappeto, però impoverito dalle parti più fini.

Sulla genesi di questi « sinkholes » sono state tentate varie spiegazioni: movimenti veloci di filtrazione al contatto immediato fra il tappeto e il letto naturale del fiume; frammenti subalvei dovuti a migrazioni (provocate dal forte gradiente idraulico) di materiali fini in zone costituite da materiali più grossolani; instabi-

lità granulometrica sotto gradiente idraulico dal materiale del tappeto, ed altre ancora.

Non mi consta che si sia ancora arrivati ad una spiegazione unanime, soddisfacente e definitiva. Però, come succede nel nostro mestiere, era necessario trovare subito rimedio anche in mancanza di una teoria completamente soddisfacente.

Il primo ordine di rimedi consisté nel sovrapporre uno spessore addizionale di materiale dello stesso tipo sul tappeto esistente; questo venne fatto a tempo di record, mettendo in opera complessivamente tre milioni e mezzo di metri cubi di materiale dal dicembre 1974 al gennaio 1975, prima che, con la chiusura delle gallerie, il tappeto venisse di nuovo sommerso.

La seconda sommersione ebbe luogo a partire dal febbraio 1975 e da allora il tappeto è sempre rimasto sott'acqua, con battenti oscillanti fra un minimo di 60 ed un massimo di 135 metri. Pur non essendo visibile ad occhio nudo, a partire dal secondo invaso nell'estate 1975, esso è stato tenuto sotto osservazione mediante uno straordinario apparecchio (chiamato in inglese « side scan sonar ») che, per mezzo di ultrasuoni, fornisce immagini quasi fotografiche dei rilievi del fondo.

Durante l'invaso 1975 venne così osservata la comparsa di numerosissimi nuovi « sinkholes », circa 450; questa volta non era più possibile ripararli all'asciutto e si dovette quindi ricorrere ad una specie di bombardamento di precisione mediante bettoline a fondo apribile, scaricanti materiale terroso specialmente preparato. Con queste si misero complessivamente in opera seicentomila metri cubi di materiale dal giugno 1975 al settembre 1976. Tanto per dare un'idea, questa operazione di bombardamento subacqueo è costata da sola circa sette milioni di dollari.

Questo secondo trattamento, aggiunto al primo fatto all'asciutto, si è rivelato molto efficace: infatti durante l'invaso 1976 i « sinkholes » di cui fu osservata la ricomparsa furono circa 100. Essi poi si sono ridotti a 17 alla fine della campagna 1977.

Con questo ho finito di raccontare le due esperienze che considero le più interessanti (anche se non sono le sole) nel campo del trattamento delle fondazioni di dighe. Come succede spesso, esse sono forse anche uniche, e quindi non molto ripetibili; mi sembra quindi opportuno aggiungere, senza aspirare ad essere originale, delle considerazioni di ordine generale derivanti da queste e da altre esperienze fatte

nel campo del trattamento delle fondazioni. Riassunte in forma schematica e partendo, ovviamente, dall'importanza essenziale, vorrei dire assiomatica, che le fondazioni ed il loro trattamento hanno nel quadro globale delle opere da costruire, queste considerazioni sono:

a) L'opportunità, anzi la necessità di non lesionare denaro nelle ricerche esplorative precedenti la progettazione definitiva di un'opera, e questo tanto più quanto più complessa è la geologia della zona.

Un esempio che non ho citato, e di cui condivido l'esperienza con il professor Croce, è quello della diga di Keban in Turchia (una diga in rockfill alta 210 m) dove, a quanto mi risulta, il lavoro è stato cominciato dopo che erano stati eseguiti in tutto e per tutto sette fori esplorativi, essendo stato progettato sulla base delle informazioni fornite da tali fori.

Il lavoro avrebbe dovuto finire nel 1971 ed è finito, per questa ragione, nel 1974, dopo che praticamente in tutta la spalla destra si sono dovute ripulire miriadi di caverne carsiche dai materiali argillosi che contenevano, e sostituirli con altrettanto calcestruzzo.

b) In secondo luogo, la necessità di continuare sistematicamente queste ricerche e questi studi durante l'esecuzione dei lavori per poter apportare in tempo le modifiche di progetto necessarie.

c) Un terzo punto, che ritengo fondamentale proprio in relazione alle nostre esperienze in sede di costruzione, è la necessità di prevedere, sia nel progetto stesso che nello studio del programma dei lavori, margini notevoli per far fronte a situazioni imprevedute tanto più probabili quanto più complesse ed incerte sono le condizioni geologiche.

d) Un altro punto, anche questo piuttosto ovvio, è la necessità di una cura particolare nell'esecuzione del trattamento di iniezioni che, a mio parere (e contro la pratica americana), deve essere sempre affidato ad un'impresa specializzata in questo campo.

e) Ed infine l'esigenza di una cura ed attenzione particolare nello studio e nella successiva esecuzione pratica del trattamento delle superfici di contatto fra diga e fondazione. Questa esigenza, valida in generale per qualsiasi tipo di diga, assume un valore fondamentale nei confronti del trattamento delle superfici di con-

tatto tra nucleo e fondazione delle dighe in terra o in terra e roccia, quanto, e a maggior ragione, nel caso che essa sia costituita da materiali alluvionali.

Con questo ho finito e ringrazio.

SUMMARY

Some experiences in foundation treatment for large dams

Some foundation problems solved by the A. firm during the construction of Kariba and Tarbela dams are reported. The utmost importance of a careful site investigation and of a proper foundation treatment are stressed.