

LA MODELLAZIONE NEL CAMPO DELLE DIGHE IN CALCESTRUZZO

Accademia Nazionale dei Lincei, Roma
Problemi strutturali dell'ingegneria delle dighe

Conferenza del 26 febbraio 2004

Dott. Ing. Giovanni Lombardi

INDICE

	pagina
1. INTRODUZIONE	1
2. EVOLUZIONE STORICA	1
3. LA MODELLAZIONE OGGI	3
3.1 In genere	3
3.2 Modellazione a priori	4
3.3 Modellazione a posteriori	6
4. INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'OPERA	7
5. ESTRAPOLAZIONE OLTRE L'ESERCIZIO NORMALE	11
6. L'APPLICAZIONE PRATICA	12
6.1 In genere	12
6.2 Correnti sotterranee	12
6.3 Calcolo termo-strutturale	13
6.4 Rappresentazione delle misure	15
6.5 Reazione alcali-silicati	15
6.6 Mania della precisione formale	16
7. CONCLUSIONI	18
8. RIASSUNTO	19

1. INTRODUZIONE

Mi sia permesso in primo luogo di ringraziare gli organizzatori di queste giornate di studio per l'onore che mi hanno fatto chiedendomi di introdurre l'argomento.

Si tratta del privilegio gentilmente concessomi di attenermi agli aspetti più generici del problema, senza doverli approfondire. Di fatto, i temi annunciati per queste giornate e gli oratori previsti ci promettono interessantissime presentazioni, che sviscereranno i principali problemi strutturali nell'ingegneria delle dighe, tanto da un punto di vista teorico quanto pratico.

Approfitto perciò di questo privilegio per attirare l'attenzione, oltre che sul calcestruzzo, anche sulla roccia di fondazione, considerata materiale di costruzione, il cui comportamento è in generale complesso e diciamo pure a volte alquanto capriccioso.

"La modellazione nel campo delle dighe in calcestruzzo" è forse un titolo troppo ambizioso per la mia presentazione, che si concentrerà essenzialmente sulle esperienze vissute nell'ambito di un'attività di consulenza nel campo dell'ingegneria civile e in particolare in quello delle grandi dighe, di cui alcune sono certamente opere assai delicate.

Chiedo sin d'ora venia se sarò a volte un po' critico verso l'operare di alcuni progettisti, costruttori e operatori di tali sbarramenti.

Con il termine di "modellazione" mi permetterò d'altro canto di intendere la creazione di una qualsivoglia "forma matematica" suscettibile di simulare con sufficiente precisione il comportamento dell'opera.

2. EVOLUZIONE STORICA

Nel corso dell'ultimo mezzo secolo il concetto di "modello della diga" ha subito una notevole evoluzione. All'inizio di detto periodo s'intendeva un modellino fisico che veniva caricato in modo opportuno e le cui sollecitazioni e deformazioni venivano misurate. In questo campo la ISMES di Bergamo sotto la competente ed entusiastica direzione del Professor Guido Oberti, recentemente scomparso, e dei

suoi successori ha dato all'ingegneria civile un notevolissimo impulso e ha permesso stupende realizzazioni, in particolare nel campo delle dighe ad arco.

Il concetto di modello a scala ridotta rimane peraltro ancora valido e attuale ad esempio nel campo dell'idraulica e più in generale nella meccanica dei fluidi, sul quale tuttavia non mi soffermerò.

Quando cinquant'anni or sono, nell'ambito della mia tesi professionale ebbi a parlare di "modello elastico" o "modello matematico" che includesse tanto l'opera in calcestruzzo quanto il massiccio roccioso di fondazione, suscitai perplessità.

Questo concetto pareva presentare qualche aspetto di novità, ma fu oggetto di sorpresa e spesso di scetticismo. Poi, la situazione cambiò assai rapidamente.

A quell'epoca furono messi sul mercato elaboratori elettronici di più in più potenti che fino allora erano stati riservati tanto in Germania quanto negli Stati Uniti quasi esclusivamente a scopi militari. Come ben sappiamo, la potenza degli stessi aumentò d'anno in anno in proporzioni strabilianti, mentre il loro costo subiva un'evoluzione contraria.

Si crearono con ciò le premesse per un enorme sviluppo del calcolo numerico in tutti i campi dell'attività umana, ed in particolare in quello delle dighe.

I primi modesti tentativi consistettero nel simulare i metodi del calcolo, diciamo, manuale in uso fino a quel momento e consistevano a volte nella semplice risoluzione numerica di espressioni analitiche; così per ottenere le deformazioni di un arco di forma ben definita sottoposto a carichi particolari.

Solo verso la fine degli anni cinquanta si incominciò ad applicare metodi veramente numerici. Si suddivise l'opera in segmenti o elementi di dimensioni sufficientemente ridotte per permettere la linearizzazione delle singole variabili in ognuno di essi. Ma anche in questo caso si trattava in fondo di una semplice automatizzazione di precedenti procedure.

L'irrompente potenza degli elaboratori condusse presto alla facile risoluzione di problemi bi-dimensionali prima e tri-dimensionali poi sulla base di "differenze finite" e successivamente di "elementi finiti".

Lo sviluppo in questo campo è stato rapidissimo e radicale; ha permesso, come ben sappiamo di risolvere problemi di elasticità, di plasticità, di elasto-plasticità e di ogni tipo di comportamento reologico dei materiali.

L'evoluzione dei relativi metodi di calcolo è ancora in corso e avremo certamente modo, in queste due giornate, di conoscerne recenti sviluppi del massimo interesse.

Come facilmente immaginabile, questa evoluzione ha avuto effetti e conseguenze importantissime nell'ambito del progetto, ma anche dell'organizzazione degli uffici d'ingegneria e nella filosofia stessa della progettazione.

L'intuizione dell'ingegnere è stata sostituita in gran misura da una sistematica ricerca parametrica, facilitata appunto dall'elaboratore con notevoli vantaggi nella definizione della soluzione ottimale ma anche, come andremo vedendo, con alcuni aspetti negativi di cui si dovrà, a parer mio, tenere debito conto in avvenire prendendo adeguate contromisure.

3. LA MODELLAZIONE OGGI

3.1 In genere

La modellazione, quasi esclusivamente per mezzo di elementi finiti di svariatissimi tipi e categorie, domina oggi, con poche eccezioni, il campo dell'analisi strutturale delle dighe.

È pure fuori discussione e di pratica comune che la modellazione si estenda non solo al corpo della diga stessa, ma includa un sufficiente volume del massiccio di fondazione. Questo concetto era tutt'altro che ovvio cinquant'anni or sono, quando rinomati progettisti ritenevano assolutamente inutile introdurre nei calcoli sia la resistenza sia la deformabilità del massiccio roccioso. Solo dopo ben noti inconvenienti e disastri, le opinioni si sono giustamente modificate. V'è pure da dire che da quell'epoca in poi le dimensioni delle opere sono notevolmente aumentate e furono realizzate anche in condizioni geologiche meno favorevoli.

Dal punto di vista delle loro caratteristiche mi sembra opportuno distinguere due tipi di modellazione, come dalla **Tavola 1** o meglio

- l'analisi e la relativa modellazione a priori effettuata in fase progettuale, ovvero prima della realizzazione dell'opera, nell'intento di migliorare ed ottimizzare il progetto sotto gli aspetti della sicurezza, durabilità, economia, inserimento nell'ambiente o altro, e

– d'altra parte, la modellazione a posteriori dell'opera, ovvero a opera costruita nell'intento di verificarne le ipotesi progettuative, di meglio capirne il comportamento e di poterne quindi garantire la sicurezza.

Non si esclude ovviamente un certo connubio tra le due forme di modellazione, benché per dighe di una certa età solo la seconda forma sia fattibile e ciò per ovvie ragioni storiche.

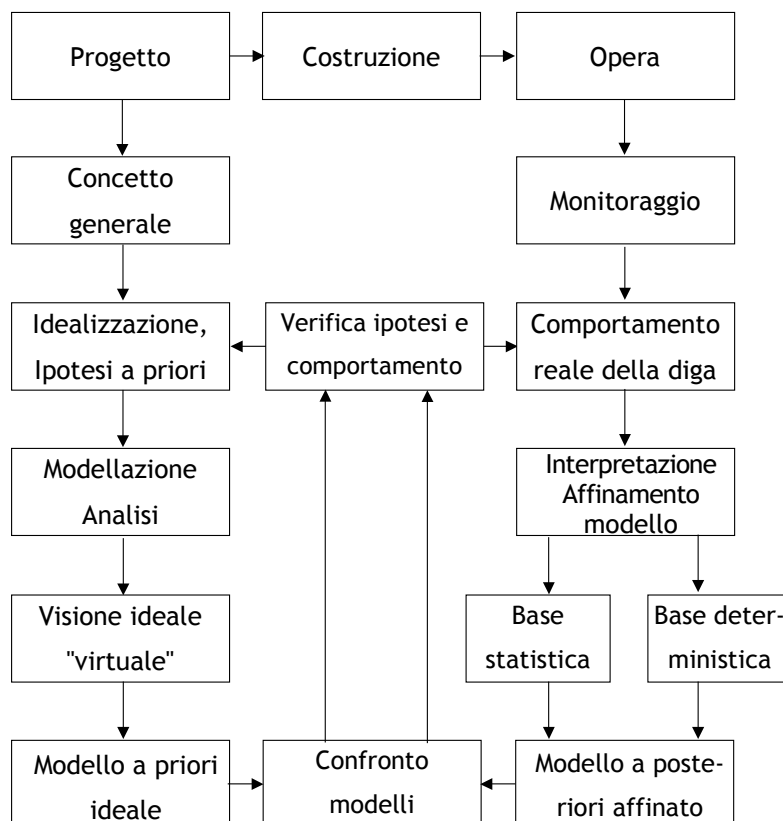


Tavola 1: Modelli a priori e a posteriori della diga. In realtà i modelli sono sempre definibili solo con una certa precisione per incertezze intrinseche e per questioni epistemiche.

3.2 Modellazione a priori

La modellazione a priori, realizzata appunto nell'ambito di un'attività progettuale, deve inevitabilmente essere fondata su una visione ideale o idealizzata dell'opera e dell'ambiente nel quale sarà inserita.

In realtà è inevitabile formulare certe ipotesi sulla natura ed il comportamento del calcestruzzo che non esiste ancora, nonché sulle procedure della sua messa in opera. Si dovranno ignorare le inhomogeneità e anisotropie del materiale, non prevedibili, relative alla sua deformabilità, resistenza, porosità, permeabilità, com-

portamento reologico o conduttività termica. Sarà perciò indispensabile far ricorso a semplificazioni più o meno arbitrarie in merito alle proprietà fisiche dei materiali, con la ovvia possibilità di uno studio parametrico per un certo numero di fattori.

Per altro verso, le proprietà del massiccio di fondazione, in quanto preesistente alla realizzazione dell'opera, potrebbero sì essere indagate in modo approfondito, ma purtroppo, per ragioni contingenti o di natura finanziaria o procedurale o in relazione ai tempi disponibili, raramente le indagini effettuate potranno essere esaustive. Nemmeno la futura superficie d'imposta dell'opera sarà visibile per tempo.

La dispersione delle proprietà geotecniche della fondazione sarà di regola notevole e difficilmente le indagini eseguibili permetteranno di avere una visione completa e perfetta delle condizioni della fondazione di una grande opera.

La modellazione a priori farà ovviamente astrazione anche di aspetti o eventi imprevedibili o comunque non previsti al momento della progettazione. Può trattarsi:

- di sorprese geologiche più o meno probabili a seconda della natura del terreno;
- di comportamenti del calcestruzzo non immaginati, come rigonfiamenti, o
- di interventi di terzi, come ciò accade per la diga di Zeuzier (Svizzera) dove notevoli assestamenti nella fondazione furono causati da un cunicolo d'indagine scavato in vista del progetto di una galleria autostradale (**Figura 1**);
- di condizioni d'esercizio diverse da quelle assunte in progetto (sovrizzo della diga, piene particolari, interrimento del serbatoio, ecc.).

Ma anche eventi che possono avere luogo durante la costruzione, come programmi di costruzione non rispettati, condizioni ambientali anomale durante i getti e altri fattori che conducono ad uno stato termico dell'opera differente da quello inizialmente ipotizzato. Numerose sono poi le circostanze accidentali dei processi costruttivi che possono introdurre importanti stati di co-azione. Assai spesso saranno le condizioni ai limiti che differiranno da quelle inizialmente ritenute più probabili.

Comunque sia, questa fase di studio condurrà alla definizione di un primo modello deterministico dell'opera da realizzare, sul quale avremo modo di ritornare.

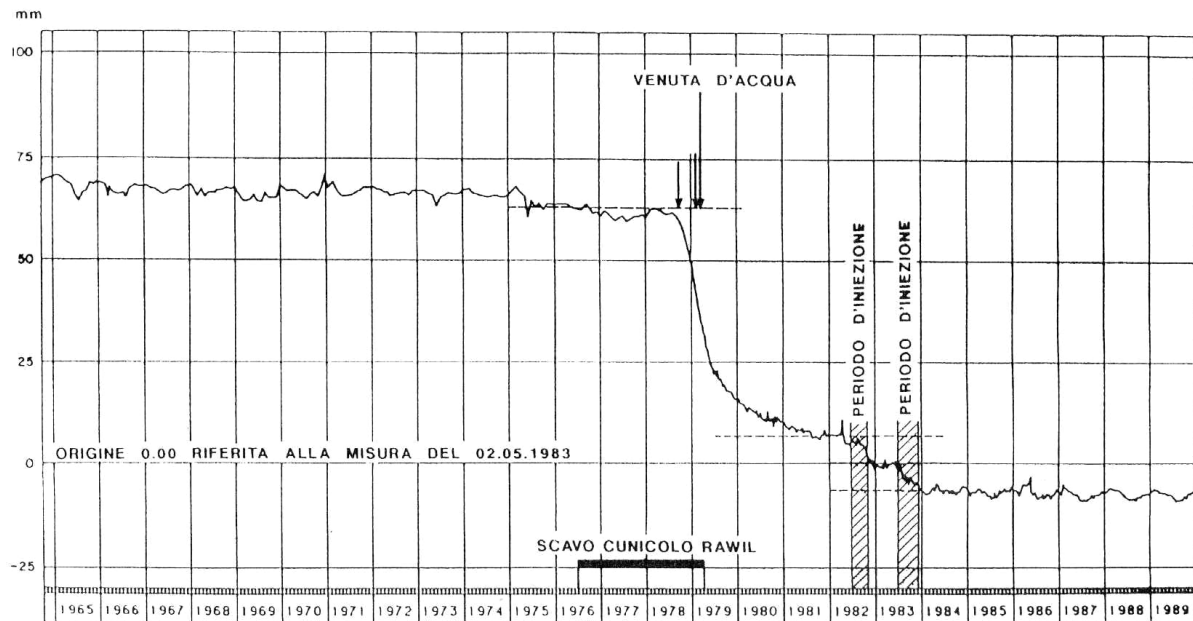


Figura 1: Diga di Zeuzier. Deformazione di confronto teorica. Pendolo centrale (P2) - Livello 1740.40 radiale. Periodo: ottobre 1964 - dicembre 1989

3.3 Modellazione a posteriori

Dopo la messa in servizio della diga, sarà di regola necessario procedere ad una nuova modellazione che tenga conto delle informazioni acquisite durante la costruzione.

Può trattarsi della temperatura iniziale del calcestruzzo, dello stato termico ad opera ultimata, della procedura di raffreddamento del calcestruzzo e di iniezione dei giunti, dell'eventuale invaso parziale durante la costruzione o delle conoscenze geologiche e geomeccaniche, delle caratteristiche reali del calcestruzzo, o di pressioni idrauliche. La miglior conoscenza delle condizioni di contorno permetterà chiaramente di affinare la modellazione.

Non ci si faccia tuttavia soverchie illusioni in quanto, anche in questa fase, la conoscenza dell'opera sarà solo parziale. Ad esempio, la resistenza e deformabilità del calcestruzzo saranno distribuite in forma aleatoria nel corpo della diga. Nella migliore delle ipotesi se ne conoscerà il valore medio e la dispersione. Fessure e altre discontinuità nascoste potranno avere un influsso sul futuro comportamento dell'opera. Infine, l'evoluzione nel tempo di vari fenomeni fisici come ritiro, raffreddamento, viscosità, espansione del calcestruzzo, e in certi casi anche di ele-

menti della fondazione, come ad esempio le pressioni interstiziali, potranno essere apprezzati solo puntualmente.

4. INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO DELL'OPERA

Che il monitoraggio continuo di una diga sia indispensabile per garantirne la sicurezza e l'operabilità è un concetto oggi generalmente accettato. Il modo in cui detto monitoraggio avviene, ed in particolare i metodi utilizzati per analizzare i risultati differiscono tuttavia in maniera significativa da paese a paese, e perfino da committente a committente, e ciò senza parlare della sostanziale varietà e della differente efficacia della strumentazione installata nelle varie dighe. Enormi sono le differenze che si possono riscontrare tra un'opera e l'altra in tutti gli aspetti del monitoraggio: dal tipo e numero di strumenti installati, alla frequenza di lettura fino all'interpretazione dei risultati del monitoraggio (Tavola 2).

0.	Nessun dato disponibile
1.	Solo ispezione visiva (senza misure)
2.	Solo lettura e archiviazione
3.	Esame intuitivo di plausibilità
4.	Semplice rappresentazione grafica (cronologica)
5.	Analisi puramente statistica
6.	Correlazioni statistiche
7.	Confronto statistico basato su modello deterministico

Tavola 2: I diversi livelli di affinamento del monitoraggio.

- Il caso estremo è dato da quelle opere, in genere di età avanzata, che non posseggono alcuna strumentazione e dove ci si accontenta di una semplice ispezione visiva.
- Un caso non così infrequente come si potrebbe pensare, è quello in cui gli strumenti non vengano nemmeno letti, anche se talvolta sono ancora in condizione di funzionare.

- Al livello seguente troviamo casi nei quali i valori letti vengono semplicemente registrati ed archiviati senza alcuna verifica. Potrei citare il caso di una diga ad arco, in un paese tutt'altro che sottosviluppato, per la quale durante trent'anni i valori delle resistenze elettriche misurate sugli estensimetri erano state accuratamente registrate ed archiviate senza che si procedesse ad alcun controllo. All'occasione di un problema sorto successivamente, ci si accorse che per un errore di cablaggio erano sempre stati misurati ed archiviati i valori totalmente inutili relativi alle temperature dei singoli strumenti, non quelli relativi alle dilatazioni, come si supposeva. A compenso, occorre riconoscere che era stato chiaramente provato che in estate le temperature erano nettamente più elevate che non in inverno e dunque che la diga si trovava nell'emisfero nord!
- Il livello successivo assai frequente, per non dire abituale, consiste nell'osservare in modo superficiale la serie dei dati disponibili onde mettere forse in evidenza eventi del tutto eccezionali - spesso associati alla disfunzione della strumentazione - ignorando scarti meno appariscenti. Si tratta di fatto di un rudimentale esame di plausibilità di tipo intuitivo.
- A livello superiore i dati strumentali vengono rappresentati graficamente e accuratamente registrati in rapporti periodici che però nessuno esamina con occhio sufficientemente critico.
- Il passo seguente consiste in un'analisi statistica che si limita a stabilire alcune correlazioni tra cause ed effetti e a procedere al confronto dei dati attuali con quelli dei periodi precedenti.
- Un sistema più raffinato, utilizzato da parecchi gestori di talvolta importanti parchi di dighe, mette in evidenza relazioni statistiche tra il valore misurato e vari argomenti quali la quota d'invaso, la stagione ed il tempo trascorso dalla costruzione dell'opera.
Vengono poi definiti limiti di accettabilità o di allarme come multipli delle dispersioni quadratiche medie ricavate dai dati storici.
- L'ultimo livello, quello più completo ed affidabile, consiste nel procedere ad un confronto dettagliato del comportamento reale dell'opera con quello di un modello, detto deterministico, adeguatamente calibrato. Si cerca di sapere in ogni momento se l'opera si comporta come previsto, e di spiegare le deviazioni osservate.

Senza poterci soffermare sui pregi e punti deboli dei vari livelli di affinamento constatati nell'interpretazione del comportamento della diga, conviene osservare che in quest'ultimo stadio sorge ancora il problema della divergenza che sussiste inevi-

tabilmente tra il comportamento reale dell'opera e la visione ideale concepita in fase progettuale. In altre parole, si tratta della differenza osservabile tra modellazione a priori e modellazione a posteriori. Se la modellazione a priori è disponibile, potrà trattarsi, il più delle volte, dell'aggiustamento di un certo numero di parametri sulla base di considerazioni statistiche. Se invece la modellazione a priori non esiste, si dovrà far ricorso a tecniche di analisi diverse onde definire i parametri e la formulazione del modello interpretativo.

L'intento di questa messa a punto è di ridurre il più possibile lo scarto tra il valore misurato e quello ricavato dal modello interpretativo in condizioni di carico identiche.

Lo scopo essenziale del monitoraggio è in definitiva quello di riconoscere tempestivamente e in modo affidabile qualsiasi comportamento anomalo di una diga onde fornire ai responsabili tutti gli elementi necessari per la definizione mirata di eventuali interventi. Di fatto, si tratta di prevedere il comportamento teorico normale della diga e di confrontarlo con quello reale osservato.

La messa a punto del modello deterministico destinato a simulare il comportamento reale della la diga può farsi per mezzo di una nuova analisi completa basata sulle caratteristiche dei materiali messe in evidenza, oppure mediante la correzione su base statistica di alcuni coefficienti. Si arriva così al concetto di modello ibrido.

La **Figura 2** mostra a titolo d'esempio l'effetto della calibrazione a posteriori del modello deterministico allestito 40 anni prima. Esso ha permesso di ridurre da 4.5 mm a 1.6 mm lo scarto quadratico medio tra i valori misurati e quelli risultanti dalla simulazione relativi, i due, allo spostamento di un punto della diga di Contra in Verzasca (Svizzera).

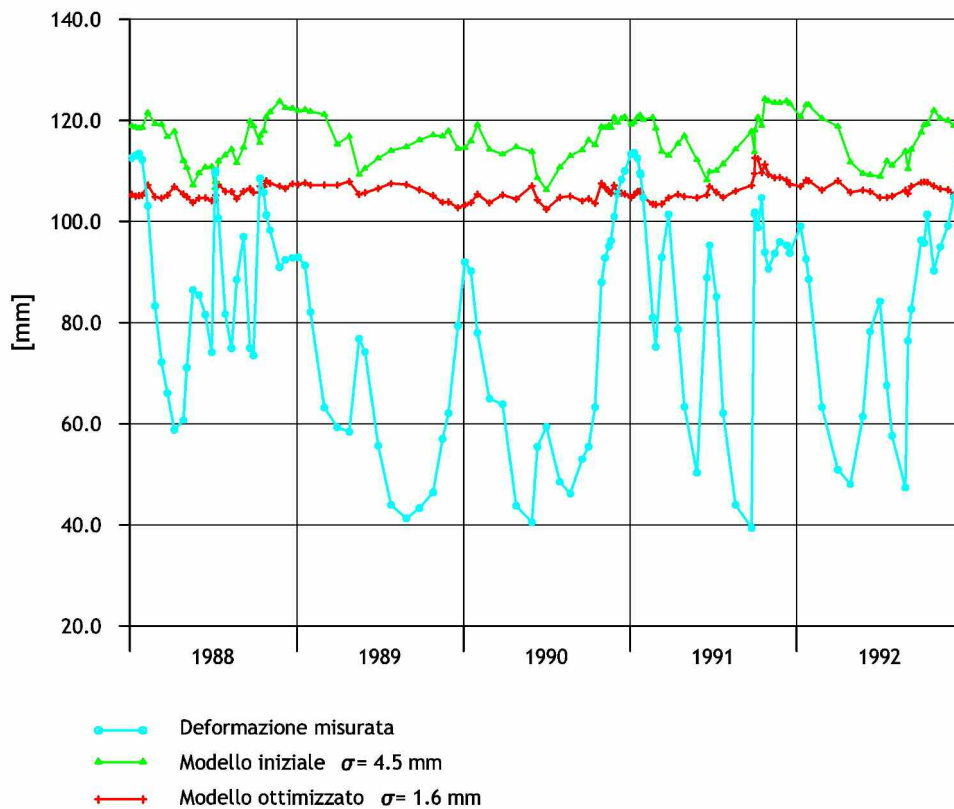


Figura 2: Calibrazione del modello deterministico. Deformazione radiale in chiave al coronamento.

Da quanto detto, risultano i tipi di modelli indicati nella Tavola 3.

MODELLI DELLA DIGA	
Tipo:	Caratteristiche
Deterministico:	Allestito a priori Base fisica Senza aggiornamenti
Statistico:	Allestito a posteriori Base numerica Auto-aggiornabile
Combinato:	Deterministico con calibrazione statistica dei parametri Aggiornamenti ad intervalli

Tavola 3: Tipologia dei modelli per dighe

In sunto possiamo mettere meglio in evidenza la differenza tra

- "modello deterministico calibrato", o modello ibrido, e
- "modello statistico"

dicendo che nel primo caso si parte da un modello deterministico basato sulle leggi fisiche conosciute e si utilizzano i dati del monitoraggio per affinarne e calibrarne i vari parametri mediante un'analisi statistica.

Nel secondo caso si parte da un modello matematico arbitrario e se ne definiscono i parametri con un'analisi statistica, senza preoccuparsi eccessivamente della compatibilità del modello con la sottostante realtà fisica.

5. ESTRAPOLAZIONE OLTRE L'ESERCIZIO NORMALE

Anche se spinta all'estremo delle sue possibilità teoriche e pratiche, l'interpretazione del monitoraggio della diga può in generale spiegarne il comportamento solo per casi di carico normali per i quali l'opera è stata progettata. Non lo può fare per casi di carico estremi, o semmai solo in circostanze del tutto particolari. Eventi di probabilità come piene decamillenarie o sollecitazioni sismiche straordinarie non si sono di regola ancora avverati.

L'estrapolazione oltre i limiti dell'esercizio normale e la definizione dei margini di sicurezza rimanenti non può essere se non compito di un'ulteriore analisi teorica basata su di una modellazione che può anche presentare particolarità rispetto a quella a posteriori utilizzata per l'interpretazione dei dati di monitoraggio (ad esempio nuove fessurazioni, non linearità di diverso tipo, meccanica della rottura).

Con ciò si arriva a definire tre tappe nella modellazione dell'opera, ovvero

- modellazione a priori relativa alla fase di progettazione;
- modellazione a posteriori relativa alla fase d'esercizio normale, e
- modellazione limite allo scopo di definire i margini di sicurezza rispetto a carichi estremi a cui l'opera non è ancora stata sottoposta.

È facilmente immaginabile che tecniche - di analisi e calcolo - differenti si applichino ad ognuna delle tre fasi.

Non v'è dubbio, per altro verso, che la capacità di calcolo tuttora disponibile e la competenza dei ricercatori permetteranno di risolvere quei problemi che ancora rimangono aperti.

6. L'APPLICAZIONE PRATICA

6.1 In genere

Di fronte all'imponente sviluppo della teoria, delle tecniche di calcolo e dei metodi messi a disposizione dell'ingegnere, mi corre l'obbligo di richiamare l'attenzione su di un rischio già segnalato in varie circostanze e non solo da chi vi parla. Il rischio cioè che mezzi di calcolo estremamente potenti vengano utilizzati da persone non sufficientemente preparate, e che da questa dicotomia possano risultare pericoli e in primis decisioni errate.

Si ha l'impressione che a volte la maggior potenza di calcolo sia considerata sufficiente a compensare in qualche modo le lacune teoriche e pratiche di chi le utilizza.

Affinché non si possa pensare che si tratta di un timore teorico fortemente esagerato - magari a sfondo psicologico - intendo menzionare e descrivere rapidamente alcuni casi presentati in modo assolutamente convinto e successivamente strenuamente difesi dai rispettivi autori di fronte a comitati internazionali di esperti. Mi permetterete certo di mantenere l'anonimato delle opere e degli attori.

6.2 Correnti sotterranee

La **Figura 3** si riferisce al caso di una modellazione a posteriori della fondazione granitica di una diga di 100 metri di altezza nella sezione considerata. L'opera è munita di uno schermo di iniezione e di una galleria di drenaggio a valle dello stesso di cui si conosce la portata infiltrata. Lo specialista incaricato di studiare il flusso sotterraneo ha ritenuto ammissibile la scelta di un modello di permeabilità anisotropa con permeabilità orizzontale superiore a quella verticale.

La figura mostra chiaramente come il risultato del calcolo si traduca in un flusso orizzontale a poca profondità diretto da monte verso valle, che esce dal modello, per rientrarvi a quota inferiore e ritornare da valle verso monte in direzione della galleria di drenaggio.

Il calcolo ha funzionato egregiamente, ma l'ingegnere ha commesso tre gravissimi errori che tradiscono l'ignoranza di altrettante realtà fisiche, matematiche e geologiche.

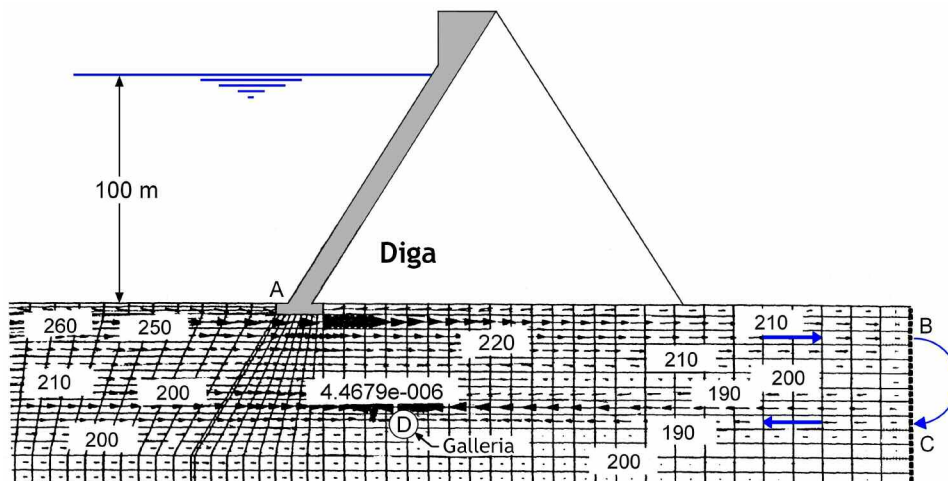


Figura 3: Correnti sotterranee nella fondazione di una diga ad archi multipli. L'acqua percorrerebbe una distanza di 450 m per raggiungere la galleria che dista soli 50 m dal bacino.

In primo luogo l'operatore ha variato la permeabilità verticale mantenendo fissa quella orizzontale fino ad ottenere una portata di drenaggio eguale a quella misurata nella galleria. Con ciò egli ha dimostrato di ignorare la legge fondamentale secondo la quale in corpi permeabili è il valore assoluto delle permeabilità che determina le portate, non il rapporto tra le varie componenti. Quest'ultimo determina invece la forma della rete di flusso.

Il secondo errore si riferisce alle condizioni ammesse sui bordi verticali del massiccio roccioso, dove le pressioni interstiziali sono state semplicemente fissate in forma idrostatica. Egli ha dunque ignorato il fatto che con questa condizione ai limiti s'introduce implicitamente una permeabilità verticale infinita in assoluta contraddizione con le ipotesi fatte per il corpo roccioso stesso.

Il terzo errore, consiste nell'aver scelto un rapporto tra la permeabilità orizzontale e quella verticale di 500 a 1 dimostrando con ciò una totale misconoscenza della geotecnica e delle proprietà del massiccio roccioso di fondazione.

6.3 Calcolo termo-strutturale

Una diga a speroni presentava una notevole fessurazione chiaramente riconducibile alla differenza di temperatura tra la testa mantenuta fredda dall'acqua dell'invaso e lo sperone stesso sottoposto invece ad una intensa radiazione solare.

Il progettista, avendo a disposizione un potente programma ad elementi finiti ha presentato come risultato lo stato tensionale indicato dalla **Figura 4**. La fessurazione constatata era sì più o meno correttamente simulata, ma lo sperone si appoggiava unicamente sulle sue estremità B e C , e si sollevava di 6 mm nel punto A dalla fondazione. Benché impetuosamente difeso dal suo autore, questo studio conteneva due errori fondamentali relativi alle condizioni ai bordi.

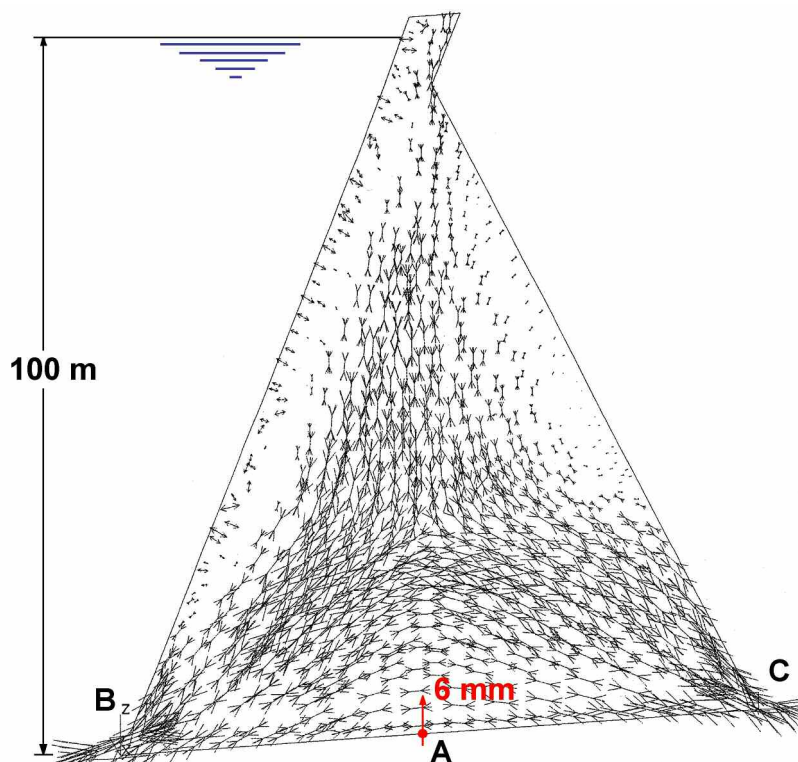


Figura 4: Diga a speroni di 100 m. Un aumento di 15°C della temperatura staccerebbe lo sperone di 6 mm dalla fondazione nel punto A, mentre lo sperone si appoggierebbe unicamente nei punti B e C.

In primo luogo il "calcolatore" aveva ommesso di precisare la temperatura iniziale del calcestruzzo. La stessa è stata automaticamente scelta dal programma pari a 0°C, creando con ciò un salto termico di 35°C, invece che di 15°C. Il carico termico reale risultava più che raddoppiato.

In secondo luogo, la roccia del massiccio di fondazione essendo stata mantenuta fredda creava quell'enorme contrazione orizzontale alla base dello sperone, causa dell'assurdo stato tensionale e deformativo prodotto dal calcolo e indicato dalla figura.

6.4 Rappresentazione delle misure

La stessa leggerezza e incompetenza si riscontra purtroppo anche nel campo della semplice interpretazione dei risultati del monitoraggio.

L'assestamento di una diga in materiali sciolti avrebbe indicato significative oscillazioni anche se attenuate col passar degli anni, come visibile alla **Figura 5**. Esse erano dovute al fatto che mancando le misure nei primi anni di esercizio, la scala dei tempi era stata distorta in modo assai grossolano. L'interpolazione forzata dei dati disponibili a intervalli differenti spiegava l'anomalia segnalata. Questo comportamento, del tutto assurdo, non aveva tuttavia attirato nessun commento.

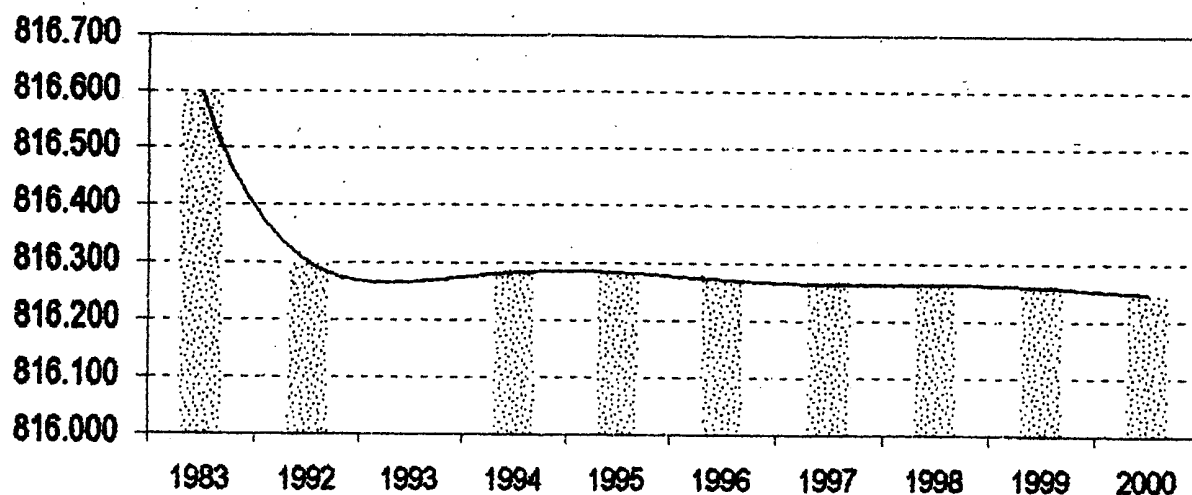


Figura 5: Diga in materiali sciolti. Assestamento per consolidazione. Risalita apparente negli anni 1993 - 1994 dovuta alla distorsione della scala dei tempi.

6.5 Reazione alcali-silicati

Lo spostamento verso valle del coronamento di una diga a volte multiple è stato interpretato, secondo la **Figura 6**, con una legge a gradini, ovvero come una serie di slittamenti dell'opera sulla sua fondazione. In realtà si tratta delle conseguenze di una reazione alcali-silicato e dunque di un fenomeno progressivo abbastanza regolare, come visibile dalla **Figura 7**.

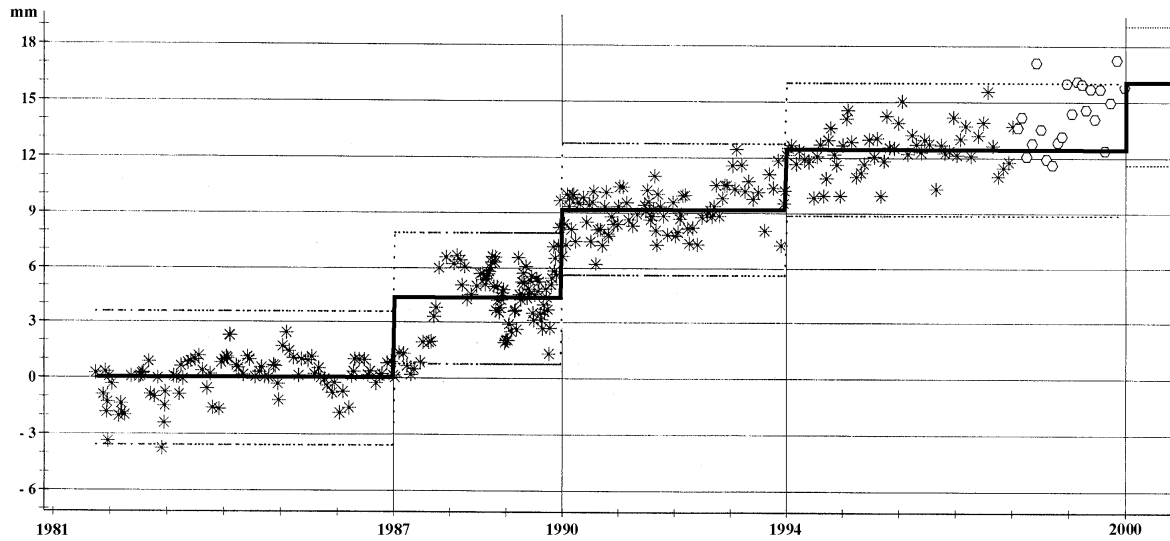


Figura 6: Interpretazione a scatti di un'evoluzione continua dovuta a reazione alcali-silicato.

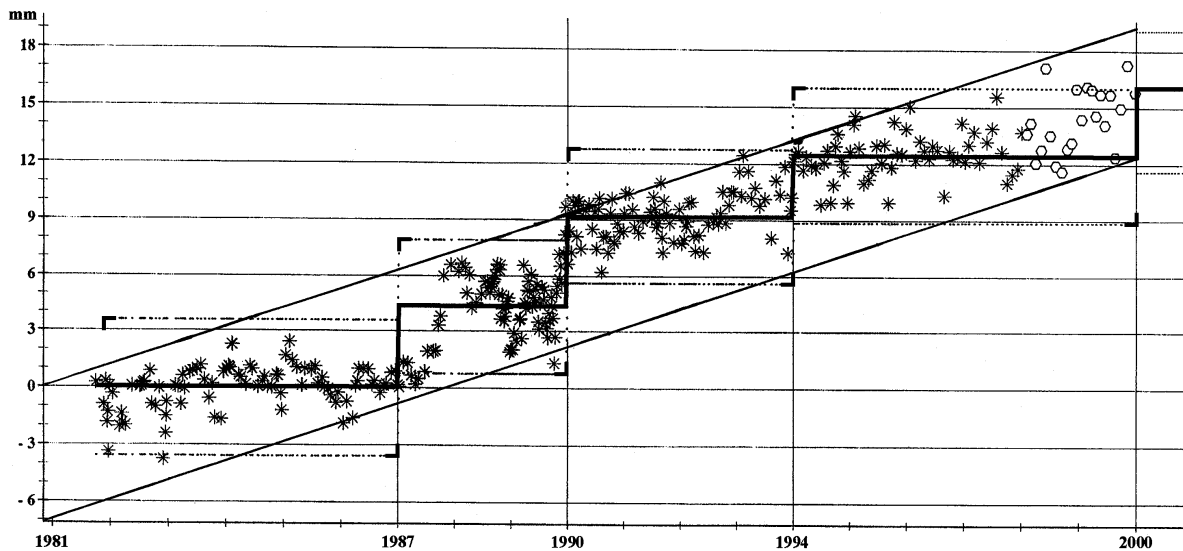


Figura 7: Interpretazione corretta dell'evoluzione dello spostamento dovuto a reazioni alcali-silicato (confronto con figura 6).

È ovvio che le misure da prendere per risanare la diga saranno assai differenti da quelle ipotizzabili sulla base della prima interpretazione.

Quest'esempio dimostra come la scelta a priori di un modello interpretativo non adeguato possa condurre, in tutta logica, a conclusioni errate.

6.6 Mania della precisione formale

La mania della precisione numerica illimitata sembra poi non aver limiti.

In una diga ad arco che si era sempre comportata in modo ineccepibile, si sono constatate negli anni dal 1997 al 2001 degli strani aumenti progressivi della deformazione tangenziale indicata da un pendolo, spostamenti che però si annullavano sempre molto rapidamente (Figura 8).

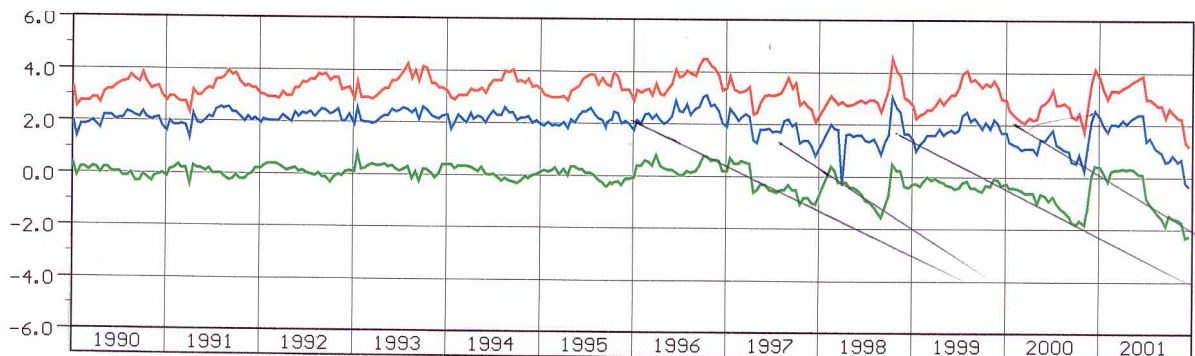


Figura 8: Deviazione di un pendolo inverso dovuta a strato di materia organica.

L'ingegnere incaricato del controllo si è subito lanciato in poderosi calcoli onde stabilire una ipotetica correlazione tra la quota d'invaso e gli scarti messi in evidenza dal monitoraggio. Ha così creato una precisissima funzione di regressione nel bel mezzo di una nuvola di punti, come risulta dalla Figura 9, utilizzando coefficienti che indicavano una precisione del deci-milionesimo di millimetro, di fronte a valori di un milione di volte più importanti.

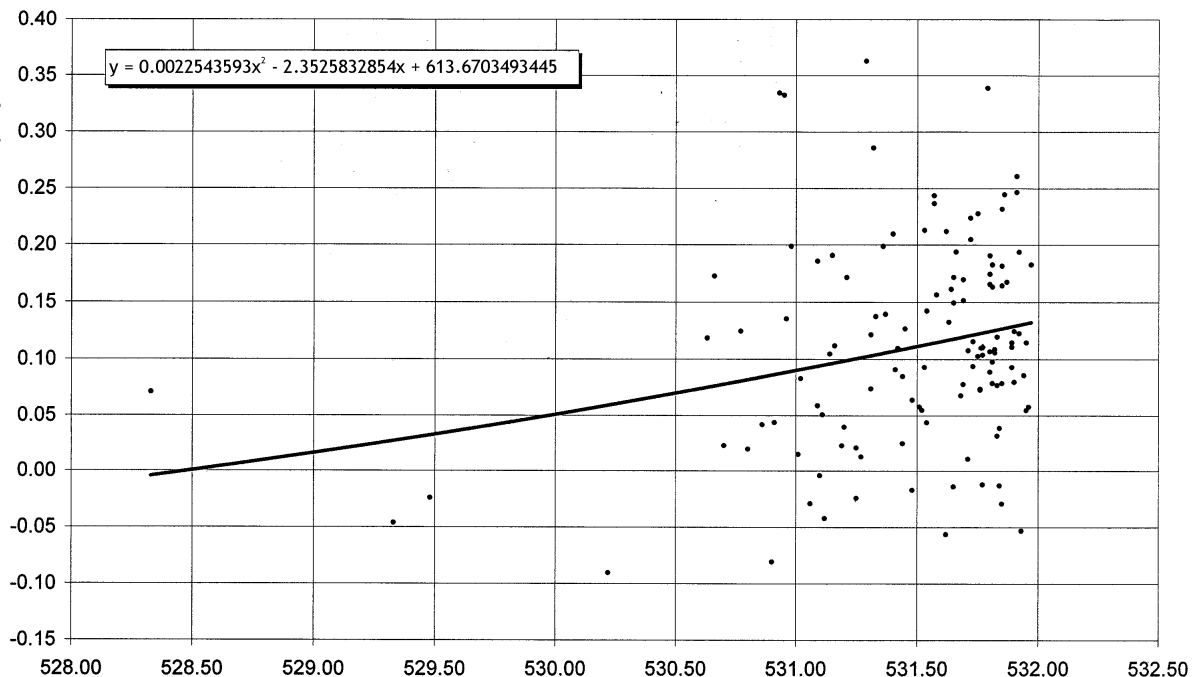


Figura 9: Interpretazione statistica in funzione dell'invaso degli scarti risultanti dalla figura 8.

Questo fatto sta a dimostrare che egli ignorava l'esistenza di limiti di precisione degli strumenti e che confidava ciecamente nel risultato della sua analisi per ridicola che sia. In realtà l'analisi conduce alla conclusione che non esiste alcuna correlazione tra le due variabili esaminate.

Egli non si era accorto che le discrepanze osservate erano dovute al galleggiante del pendolo inverso frenato nel suo movimento da uno strato di materia organica formatosi sulla superficie del liquido. Si dimostrava con ciò nuovamente la totale mancanza di senso critico. In parte la responsabilità di tali grossolani errori può tuttavia essere attribuita all'automatismo di certi programmi di gestione dati che esonerano dalla riflessione.

Gli esempi di mal-uso della modellazione potrebbero essere moltiplicati a piacimento, ma i pochi casi citati sono certamente sufficienti per arrivare ad alcune considerazioni conclusive.

7. CONCLUSIONI

Non v'è dubbio che nel campo delle dighe in calcestruzzo la modellazione assume grandissima importanza ai fini della sicurezza delle opere realizzate o da costruire. Con "modello" si può intendere una semplice relazione funzionale tra una causa ed un suo effetto, ma anche un sistema estremamente complesso composto dai più sofisticati elementi finiti che mettono in relazioni numerosi effetti con altrettante cause.

I mezzi di calcolo tuttora a disposizione sono estremamente potenti e ulteriori sviluppi sono prevedibili entro brevi termini. Possiamo perciò immaginarci che fra non molto tutti i problemi teorici importanti potranno essere risolti in modo soddisfacente.

Purtroppo, l'esame della pratica quotidiana conduce a conclusioni assai meno ottimistiche. Si costata che i problemi presentati dalle dighe sono raramente, o forse mai, dovuti ad errori di calcolo, ma bensì ad ipotesi erronee introdotte nell'analisi implicitamente o a volte accettate con estrema leggerezza.

Vi sono poi coloro che preferiscono calcolare piuttosto che ragionare e capire.

Norme, regolamenti e metodi codificati in numero eccessivo non favoriscono neppure lo sviluppo dello spirito critico in quanto rimandano ad altri la responsabilità della scelta di ipotesi e di procedure. L'utilizzo dei metodi di calcolo raffinati non può in nessun caso sostituire le conoscenze pratiche e teoriche di chi opera nel campo delle dighe.

C'è chi ha scritto:

"A conti fatti è preferibile affidare un progetto ad un ingegnere che utilizza un modello semplice di cui conosce tutti i pregi e tutti i limiti, piuttosto che a un suo collega esperto in complessità che manipola confusamente un gran numero di parametri ricavati in modo arbitrario da prove non idonee o da ipotesi non attendibili".

Il rimedio a questa pericolosa evoluzione va forse ricercato nello sviluppo dello spirito critico dello studente prima e dell'ingegnere poi. In fondo l'intuizione dell'ingegnere – basata sulla profonda e solida conoscenza delle leggi della fisica, della meccanica, della geologia e geotecnica ovvero sulle scienze naturali in genere – dovrebbe permettergli d'intravedere la soluzione del problema già prima di passare al calcolo. Solo così potrà giudicare la validità dei risultati ottenuti.

Molti degli inconvenienti costatati giornalmente potrebbero a volte essere evitati, se l'ingegnere imparasse ad essere un po' più prudente nelle sue ipotesi e forse anche un po' più modesto nei suoi intenti.

8. RIASSUNTO

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'evolu-

zione avvenne in varie fasi. 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 e allestire il modello dell'opera.

Dal punto di vista pratico bisogna distinguere diverse fasi di preparazione 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 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.

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 fu allestito.

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'strumentazione 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'extrapolare il comportamento della diga, per condizioni di carico estreme che vanno oltre quelle registrate durante l'esercizio normale dell'opera.

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

L'esperienza pratica insegna di fatto che incidenti 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 adeguate. Si nota purtroppo assai spesso, presso gli utenti di queste tecniche di calcolo, una pronunciata mancanza di spirito critico al momento dell'esame dei risultati ottenuti, sempre che detto esame venga realmente fatto.

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. Senso critico che deve basarsi su una profonda conoscenza delle leggi della natura.

9. BIBLIOGRAFIA

1. G. LOMBARDI: "Monitoraggio informatizzato e sicurezza delle dighe", Comitato Nazionale Italiano delle Grandi Dighe. Le crisi idriche in Italia - Necessità di nuovi serbatoi, Giornate di studio 13-14 novembre 1991, Accademia dei Lincei a Roma, pag. 349-372
2. G. LOMBARDI: "Concrete Dams and their Foundation - Evaluation for static Loading", International Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, Switzerland, 26-28 April 1993, Volume 4, pp. 77-90
3. G. LOMBARDI: "On the limits of structural analysis of dams", Symposium on Research and Development in the field of dams, Crans-Montana, September 7-9, 1995, Hydropower & Dams, Volume Three, Issue Five, 1996, pp. 50-56
4. G. LOMBARDI: "Conceptos de seguridad de presas", Congreso Argentino de Grandes Presas, San Martin de Los Andes, 11-15 octubre 1999
5. G. LOMBARDI: "Dighe in calcestruzzo: i problemi attuali", Conferenza al politecnico di Milano, 20 novembre 1999
6. G. LOMBARDI, F. Amberg, R. Bremen: "Long term behaviour of three arch dams", Sixth Benchmark Workshop on Numerical Analysis of dams, organised by ICOLD, Salzburg, October 17-19, 2001
7. G. LOMBARDI: "Conoscere e capire le dighe in calcestruzzo", "Problemi strutturali di attualità nell'ingegneria delle dighe", Convegno di studio dell'11-12 aprile 2002 al Politecnico di Milano, Dipartimento d'ingegneria strutturale
8. G. LOMBARDI: "General Report on Theme 1: preparatory works and regular maintenance", International Congress on Conservation and Rehabilitation of Dams, Madrid, 11-13 November 2002