

Il crollo della diga di Teton *

P. SEMBENELLI **

SOMMARIO: Viene descritto il crollo della diga di Teton, negli Stati Uniti, verificatosi nel giugno del 1976. Vengono riportati ampi stralci del Rapporto della Commissione d'Indagine incaricata dell'individuazione delle cause del crollo, ivi comprese le conclusioni raggiunte.

Subito dopo il crollo della diga di Teton avvenuto nel giugno 1976, il Segretario agli Interni degli Stati Uniti e il Governatore dello Stato dell'Idaho hanno disposto una indagine, incaricandone un Comitato indipendente di esperti. Del Comitato facevano parte W. L. Chadwick, A. Casagrande, H. A. Coombs, M. W. Dowd, E. M. Fucik, R. K. Higginson, T. M. Leps, R. B. Peck, H. B. Seed, R. B. Jansen.

Sei mesi dopo, nel dicembre 1976, il Comitato ha consegnato un rapporto di dodici capitoli e sette appendici, completo di sintesi e conclusioni dal titolo: « Report to U.S. Department of the Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam by Independent Panel, to Review Cause of Teton Dam Failure ».

Pensando che un parere così autorevole su un evento eccezionale, anche se drammatico, potesse interessare i Colleghi geotecnici e quanti lavorano nel campo delle dighe in terra, offriamo alla loro lettura alcuni stralci del rapporto, completati da disegni, uno dei quali contenuto nello stesso documento, e da fotografie prese durante la rottura della diga. Per la precisione, del rapporto sono stati utilizzati Sommario e Conclusioni e più in particolare parte delle pagine V, VI, VII e le pagine VIII, IX e X complete. Alcuni paragrafi del capitolo 12: « Motivi della Rottura », pagina 12-1, sono stati inseriti nel Sommario allo scopo di fornire una serie di notizie più completa. Il disegno originale corrisponde alla Figura 12-11.

Lo U.S. Bureau of Reclamation e la redazione di Manchete hanno gentilmente acconsentito alla pubblicazione di quanto segue.

La traduzione dall'originale inglese all'italiano non è stata rivista dagli Autori. I Lettori scuseranno eventuali errori e locali infedeltà al testo originale. Di entrambi gli inconvenienti l'unico responsabile è colui che firma questa presentazione.

La diga di Teton crollò il 5 giugno 1976 quando l'invaso era a quota 1617 m s.m., e cioè

* Stralci dal Rapporto del Comitato Incaricato di Esaminare le Cause della Rottura.

** Dott. Ing. Piero SEMBENELLI, *Electroconsult*, Milano.

1 m circa al di sotto della soglia dello sfioratore. Sebbene a valle l'allarme fosse stato dato tempestivamente, il crollo causò la morte di 14 persone e danni per una cifra oscillante fra i 400 e i 1000 milioni di dollari.

La costruzione della diga di Teton era stata autorizzata con legge 88-583 del 7 settembre 1964. La diga è ubicata sul fiume Teton, 3 miglia a NE di Newdale nell'Idaho. Prima del 1963 la diga era conosciuta col nome di Fremont.

La diga di Teton e il suo serbatoio erano gli elementi principali facenti parte del Teton Basin Project, un progetto a carattere promiscuo inteso per controllo delle piene, produzione di energia elettrica e riserva d'acqua per irrigazione. La diga era una struttura in terra di tipo zonata con nucleo centrale, alta 95 m sull'alveo del fiume e 125 m dal punto più basso delle fondazioni. Le misure per il controllo delle fil-

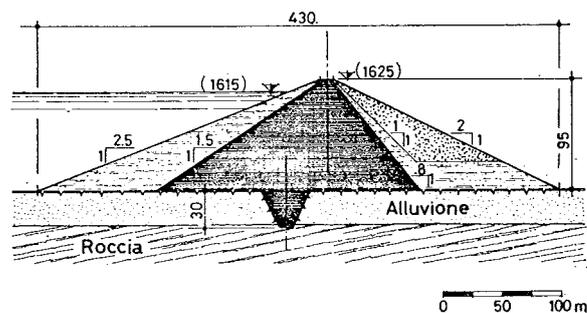


Fig. 1. - Sezione maestra della diga di Teton, U.S.A. (quote in metri).

trazioni comprendevano un taglione in roccia sopra quota 1555 e un taglione (nei materiali d'alveo) fino alla roccia sotto a tale quota. Uno schermo di iniezioni iniziava sotto ai taglioni.

Le indagini di possibili siti per una diga sul fiume Teton incominciarono nel 1904 e continuarono a più riprese fino alla gara d'appalto aperta il 22 luglio 1971. Il contratto per la costruzione della diga fu aggiudicato il 13 dicembre 1971. La diga fu portata a termine il 26 novembre 1975. Il riempimento del serbatoio iniziò il 3 ottobre 1975 e continuò fino al giorno del disastro il 5 giugno 1976.

Prima del 3 giugno 1976 a valle della diga di Teton non furono notate sorgenti o altri segni che indicassero un aumento nelle perdite di acqua.

Il 3 giugno a valle della diga apparvero delle sorgenti d'acqua limpida a una distanza di $400 \div 450$ m, sgorganti da giunti della roccia della sponda destra.

Durante la notte del 4 giugno, l'acqua deve essere colata lungo il contatto destro diga-spalla circa a quota 1586 (5200 ft) dato che al mattino presto del 5 giugno fu notata la formazione di un colatoio umido e poco profondo.

Il 5 giugno, poco dopo le ore 7.00, quando si iniziarono le prime osservazioni del fenomeno, acqua fangosa scorreva a circa $600 \div 850$ l/s dalla roccia in spalla destra circa a quota 5045 ft e un rigagnolo d'acqua torbida scendeva da quota 5200 ft. Entrambe le perdite apparivano alla giunzione tra il rilevato e la spalla destra ed ambedue aumentarono notevolmente nelle tre ore successive.

Alle 10.30 circa una larga perdita di circa 450 l/s apparve sul fronte del rilevato (forse accompagnata da un forte fragore che fu udito in concomitanza) a quota 5200 ft, a circa 4,5 m dalla spalla destra in prossimità della piccola filtrazione osservata in precedenza alla stessa quota.

La nuova perdita si allargò e sembrò emergere da un tunnel di circa 2 m di diametro, quasi perpendicolare all'asse diga, circa all'altezza della progressiva 15 + 25, e che entrava

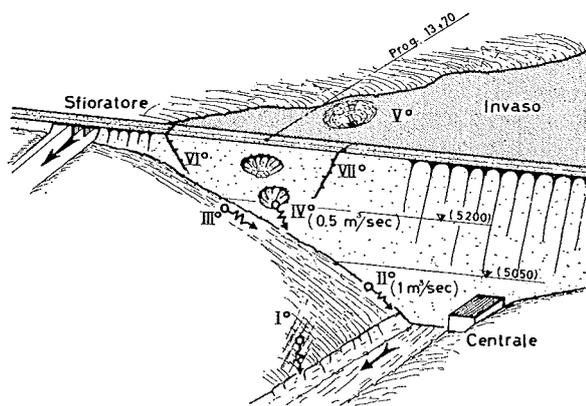


Fig. 2. - Fenomeni visibili prodottisi durante la rottura della diga di Teton U.S.A. In sequenza: I - 3 giugno; II - 5 giugno ore 7.00; III - 5 giugno; IV - 5 giugno ore 10.30; V - 5 giugno ore 11.00; VI - 5 giugno ore 11.30; VII - 5 giugno ore 11.55 (quote in piedi).

circa 10 m nel corpo diga. Il tunnel divenne una voragine che si sviluppava sul fronte del rilevato e si addentrava nel corpo diga curvando verso la spalla destra.

Alle 11.00 circa nel serbatoio si formò un vortice, attorno alla progressiva 14 + 00, sul paramento di monte della diga. Alle 11.30 un imbuto di dimensioni ridotte si aprì temporaneamente davanti alla voragine che si stava sviluppando sul paramento di valle, vicino alla cresta della diga. Poco dopo, alle 11.55, la cresta della diga cominciò a crollare in un punto tra il vortice e la testa della voragine che si andava allargando. Il crollo continuò poi come un semplice allargamento del canale attraverso il quale si scaricava il serbatoio.

Data l'importanza di determinare le reali condizioni della diga e delle sue fondazioni, la Commissione presentò al Direttore del Dipartimento Progettazione e Costruzione dell'USBR di Denver, richiesta che venissero eseguite determinate indagini in spalla destra al fine di procedere ad un esame dettagliato delle parti quivi restanti della diga e scavi per scoprire sia il tunnel ausiliario di scarico per un'ispezione interna, sia la zona dove si era formata l'importante e bassa perdita d'acqua osservata il mattino del 5 giugno 1976.

Tutti i resoconti dei testimoni circa le osservazioni da loro fatte prima dell'apertura della breccia furono attentamente studiati. Tutte le fotografie disponibili del crollo furono esaminate e ordinate cronologicamente. Tutta la documentazione disponibile pertinente fu esaminata per raccogliere il maggior numero possibile di informazioni utili.

Tutti gli scavi in spalla destra furono tenuti sotto continuo esame da parte di specialisti. Fu tracciata una mappa dettagliata dei giunti e delle fratture del taglione e delle zone adiacenti tra le progressive 11 + 00 e 16 + 00.

Furono effettuate prove di laboratorio su campioni indisturbati del materiale della Zona 1 (nucleo). Prove di perdita d'acqua in roccia furono effettuate in diversi punti in prossimità dell'asse dello schermo di iniezioni in spalla destra.

Prove di tenuta per sommersione furono eseguite sul fondo del taglione in prossimità delle fratture maggiori che l'attraversavano. Prove di frattura idraulica furono condotte in sondaggi eseguiti sui resti del nucleo in spalla sinistra.

Studi analitici furono condotti per determinare le condizioni di sollecitazione in varie sezioni della diga e del taglione nella zona del crollo.

Le conclusioni alle quali è giunta la Commissione sono riassunte qui di seguito:

1. I documenti dimostrano che la scelta del sito fatta durante il progetto preliminare fu accurata e che gli studi geologici furono adeguati ed ampi. Il programma di iniezioni di prova svolto nel 1969 prevede le difficoltà che sarebbero state incontrate durante la fase di costruzione dello schermo d'iniezioni.

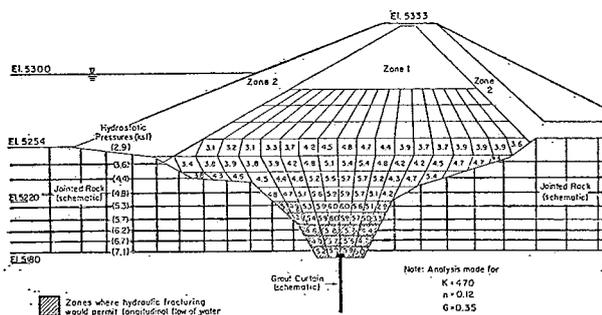


Fig. 3. - Valori delle tensioni principali minori nel piano alla progressiva 13 + 70 della diga di Teton, U.S.A., calcolati col metodo degli elementi finiti.

2. Il progetto fu eseguito secondo la prassi USBR sviluppata in lunghi anni sull'esperienza acquisita dal Bureau in altri progetti, ma non furono prese in sufficiente considerazione la variabilità e le inusuali difficoltà geologiche del sito della diga di Teton. Ogni diga può dirsi avere una sua personalità che richiede considerazioni progettuali e modalità costruttive particolari. Dalla soluzione di queste particolarità deriva la maggior parte del continuo progresso nella progettazione e nella tecnologia di costruzione delle dighe.

3. La roccia vulcanica del sito della diga di Teton è molto permeabile e da poco a molto fessurata. L'acqua era perciò libera di muoversi con quasi eguale facilità in diverse direzioni tranne che localmente dove le fratture erano state ben cementate. Perciò durante il riempimento del serbatoio l'acqua fu libera di scendere rapidamente nelle fondazioni della diga. Giunti aperti esistevano a monte e a valle del taglione in spalla destra, costituendo canali potenziali di entrata e uscita dell'acqua.

4. I limi argillosi non plastici o poco plastici, di deposito eolico, usati per il nucleo e per riempire il taglione sono altamente erodibili. La Commissione ritiene che l'uso di questo materiale contro la roccia fratturata della spalla sia stato uno dei fattori determinanti per il crollo della diga.

5. La costruzione della diga e delle altre opere

fu portata a termine da Imprese specializzate con regolari contratti redatti in accordo alla prassi vigente. Non ci furono a quanto pare controversie tra l'Impresa e i tecnici del Bureau of Reclamation che possano aver influito negativamente sulla qualità del lavoro. Le operazioni di costruzione furono conformi al progetto sotto tutti i punti di vista, tranne che per i tempi di costruzione.

6. Il ritardo nel completamento dei lavori dell'opera di scarico nel fiume limitò la possibilità di controllare, da parte del Bureau, la velocità di riempimento del serbatoio. Tuttavia la Commissione ritiene che le ragioni che causarono le fughe d'acqua e il conseguente crollo della diga non furono influenzate in realtà dal fatto che il serbatoio fu riempito più rapidamente di quanto stabilito in fase di progetto. Un riempimento più lento avrebbe ritardato il crollo ma, secondo la Commissione, lo stesso crollo sarebbe avvenuto più tardi.

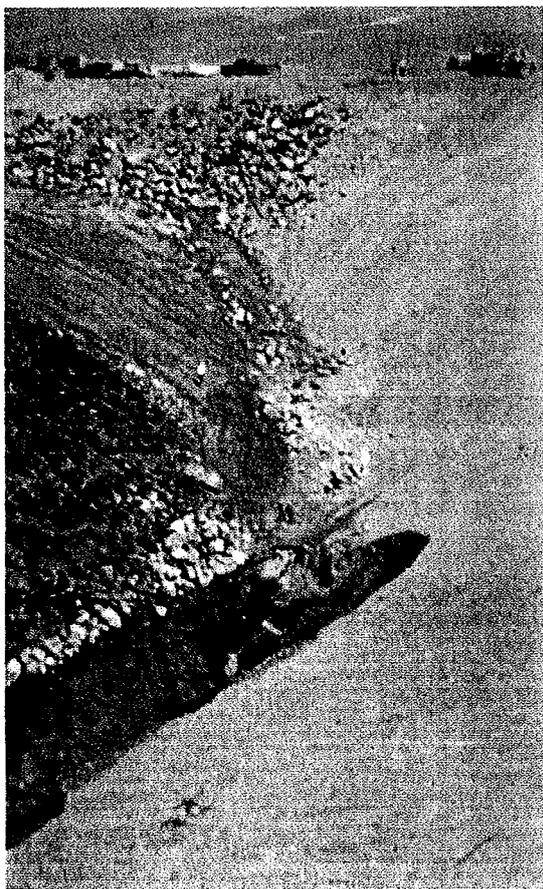
7. I documenti esistenti indicano che particolare attenzione fu rivolta ad ottenere una cortina d'iniezione di alta qualità e la Commissione considera che il risultato non sia da giudicare inferiore a quello ritenuto accettabile per altri progetti. Tuttavia le indagini svolte sul posto dalla Commissione hanno dimostrato che la roccia immediatamente al di sotto del tappeto di calcestruzzo, per lo meno in prossimità delle progressive 13 + 00 a 15 + 00, non era sigillata a dovere e che nella stessa zona altre fratture non iniettate possono essere esistite in profondità. Le perdite d'acqua sotto al tappeto di calcestruzzo erano tali da iniziare erosione regressiva nei materiali del taglione e da portare alla formazione di un tunnel di erosione attraverso la base del corpo diga. La Commissione ritiene che ci si sia atteso troppo dalla cortina d'iniezione e che il progetto avrebbe dovuto prevedere dispositivi per rendere innocue le inevitabili filtrazioni.

8. La geometria dei taglioni, con le loro ripide sponde, contribuì a produrre un effetto d'arco trasversale che diminuì le sollecitazioni nel nucleo verso la base dei taglioni e favorì la formazione di fessure che avrebbero poi portato all'apertura di tunnels attraverso il materiale erodibile del nucleo. Effetti d'arco dovuti a irregolarità del fondo dei taglioni ed effetti d'arco nei pressi di irregolarità minori e sporgenze certamente aumentarono la riduzione di sforzi.

9. Calcoli tensionali eseguiti con il metodo degli elementi finiti indicarono che alla base del taglione, circa all'altezza delle progressive 14 + 00 e 15 + 00, l'effetto d'arco era tale che la pressione dell'acqua avrebbe potuto superare la somma delle pressioni laterali e la resistenza a trazione del materiale del nucleo. Perciò una rottura per frattura idraulica era una possibilità teorica e può aver prodotto passaggio di acqua alla base del taglione tra le progressive 14 + 00 e 15 + 00 ed erosione del materiale del nucleo nel taglione.

10. Un accurato esame condotto all'interno della galleria di scarico ausiliario non portò alla scoperta di danni di alcun tipo come al contrario sarebbe stato da aspettarsi se la spalla destra che era attraversata dal tunnel avesse subito cedimenti significativi o altri cambiamenti strutturali. Misure geodetiche di controllo mostrarono solo piccoli movimenti di superficie, risultato del riempimento e dello svuotamento del serbatoio. Perciò non si ritiene che spostamenti differenziali della fondazione abbiano contribuito al crollo.

11. La Commissione non ha trovato indizio



che eventi sismici siano stati concause nel crollo della diga.

12. La diga e le sue fondazioni non furono sufficientemente strumentate per permettere al Responsabile della Costruzione e al suo personale di essere sufficientemente informati delle mutate condizioni nella diga e nelle spalle.

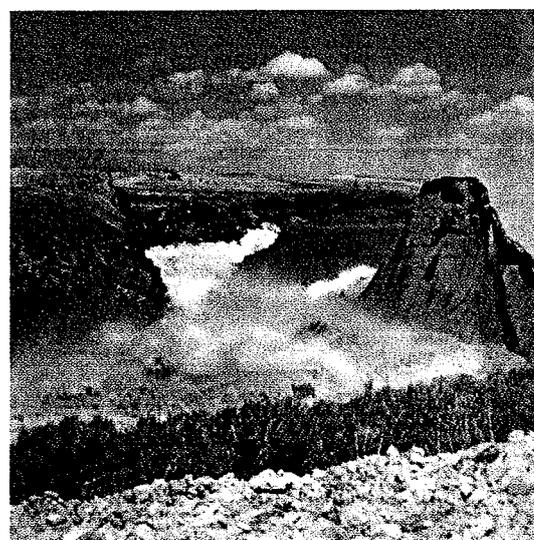


Fig. 4. - Il crollo della diga di Teton, U.S.A. documentato con foto scattate nell'arco di circa un'ora.

13. Sin dalla prima sessione di lavoro, la Commissione riferì che sembrava che il crollo della diga fosse avvenuto per erosione regressiva, un processo per il quale il materiale del rilevato viene eroso internamente e trasportato dall'acqua che passa attraverso qualche condotto nel rilevato. Questa conclusione rimane valida. Le indagini della Commissione sono state da allora volte a stabilire la modalità più probabile per cui tale fenomeno di erosione sia cominciato. La Commissione considera che due possibilità sono da sospettare. Esse possono essersi verificate ciascuna separatamente o entrambe in concomitanza. La prima può essere stata lo scorrere dell'acqua contro il materiale altamente erodibile e non protetto che riempiva il taglione e attraverso le fratture non sigillate della roccia immediatamente al di sotto del tappeto di calcestruzzo in prossimità della progressiva 14 + 00 con la conseguente apertura di un tunnel di erosione su tutta la base del nucleo nel taglione. La seconda, il cedimento causato da deformazioni differenziali o frattura idraulica del materiale del nucleo che riempiva il taglione. Anche questo cedimento avrebbe portato alla formazione di tunnels di erosione attraverso al nucleo nel taglione che avrebbero permesso una rapida erosione interna.

In entrambi i casi l'infiltrazione d'acqua attraverso il taglione avrebbe dato inizio a ulteriori erosioni lungo il contatto di valle tra il nucleo e la roccia della spalla. Poiché il materiale del nucleo era altamente erodibile e resistente, qualsiasi tunnel di erosione lungo il contatto con la roccia si sarebbe allargato a formare grandi tunnels o caverne di erosione prima di diventare visibile a valle della diga.

Si noterà che questa descrizione del meccanismo di rottura non fornisce una conclusione finale sulla causa specifica del crollo della diga di Teton. Certamente varie condizioni locali e il progetto della diga contribuirono al crollo, ma dato che la sezione crollata fu trasportata via dall'acqua non sarà probabilmente mai possibile stabilire se la causa principale dell'infiltrazione in prossimità della progressiva 14 + 00 fu dovuta ad imperfetta iniezione della roccia sotto al tappeto di calcestruzzo o al cedimento del nucleo nel taglione o a tutte e due. Ci sono prove che sostengono sia l'uno che l'altro punto di vista.

Tuttavia, anche se sarà impossibile stabilire la causa vera del crollo, l'aver ristretto la ricerca delle possibili cause a questi due aspetti è un'importante anche se tragica lezione per

la progettazione e la costruzione di opere simili in futuro.

14. La causa fondamentale del crollo potrebbe essere considerata una combinazione di fattori geologici e di decisioni di progetto che prese insieme hanno permesso al crollo di prodursi. I principali fattori geologici furono: 1) numerose fratture esistenti nella roccia delle spalle e 2) scarsità di materiali più adatti dei materiali eolici altamente erodibili e fragili, per la costruzione della zona impermeabile della diga. Le decisioni progettuali comprendevano tra l'altro: 1) la totale dipendenza per il controllo delle filtrazioni da taglioni riempiti di materiali eolici e da uno schermo d'iniezioni; 2) la scelta di una geometria per il taglione che favoriva gli effetti d'arco e la fessurazione e la frattura idraulica nel nucleo fragile ed erodibile; 3) l'aver confidato nella compattazione speciale dei materiali come unica protezione contro l'erosione regressiva e l'asportazione del materiale lungo e dentro i giunti aperti tranne che per alcune fratture più importanti sulle spalle di valle del taglione dove fu usato un intasamento di calcestruzzo e 4) inadeguati dispositivi di raccolta e scarico controllato delle acque di filtrazione e delle perdite che inevitabilmente avrebbero avuto luogo nella roccia di fondazione e nei taglioni.

Le difficili condizioni della zona chiedevano di fare in fase di progetto le ipotesi più sfavorevoli, suggerite dalle condizioni geologiche, riguardo il comportamento dell'acqua ed i suoi possibili effetti sulla diga. Invece di dipendere così fortemente dai taglioni e da una cortina d'iniezione, si dovevano sviluppare dispositivi per rendere inoffensiva qualsiasi quantità di acqua avesse attraversato il nucleo per qualsiasi causa.

In conclusione, in condizioni difficili, che richiedevano la migliore capacità ed esperienza della professione ingegneristica per assicurare il buon funzionamento della diga di Teton, fu fatta una scelta sfortunata di progetto e furono prese precauzioni inferiori al convenzionale; queste circostanze hanno infine condotto al crollo.

BIBLIOGRAFIA

Chi volesse avere ulteriori notizie, anche se parziali e preliminari ma facilmente ottenibili, sulla diga di Teton può consultare i seguenti articoli:

1. Extract from December 1975 issue of the EM-Kayan.
2. Preliminary Report issued by the Bureau, June 7, 1976.
3. News Release issued by Morrison Knudsen, June 11, 1976.
4. News clipping from Idaho Statesman, June 11, 1976.