34.2

III CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS

BELO HORIZONTE - MINAS GERAIS - 1966

A C I D E N T E S E M B A R R A G E N S

Victor F.B. de Mello

O F E R E C E
VICTOR F. B. DE MELLO

R E S U M O

Discutem-se alguns casos de acidentes em barragens, com a finalidade de se extrair uma lição da conceituação moderna perante problemas de projeto, construção e observação de barragens. Postula-se que o eventual imprevisto é inevitável em problemas de geologia, e que, portanto, o importante será prover-se os meios para que se evite o acidente catastrófico. Com relação a êste propósito, analisam-se requisitos básicos e alguns pontos importantes.

S U M M A R Y

Some case histories of dam disasters are briefly reviewed for the purpose of establishing the lessons in common in the faces of problems of design, construction and observation of dams. It is postulated that the eventual unforeseen is inevitable in problems of geology, and that therefore the important point will be to provide means to avoid accidents being catastrophic. Basic requisites and some important illustrative points are discussed with reference to this intent.

-Diretor Superintendente da Geotécnica S.A. - Engenheiros Consultores. -Professor Catedrático da Escola de Engenharia de São Carlos e da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Univesidade de São Paulo.

3º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Belo Horizonte, 1966, volume 1, 5a seção, pp V-54-V-73.

A C I D E N T E S E M B A R R A G E N S

O têrmo acidente compreende a conceituação dupla de um imprevisto e de um acontecimento indesejável. Subdivide-se no tocante à natureza e magnitude de suas consequências em dois grupos nìtidamente distintos: o catastrófico, ocasionando danos a terceiros incluindo a devastação ou mortes, ou ambos; e o comum, que resulta na exigência de trabalhos de vigilância e de reparos adicionais maiores do que previsto ou fàcilmente admissível de acôrdo com a conceituação técnico-econômica do projeto original.

Tôda barragem representa obra eminentemente de perturbação do regime natural. Os rios são a expressão fisiográfica do caminho de fraqueza, atacado pela decomposição e erosão. Também, via de regra, como bem afirma o Engº F.C.Walker, engenheiro chefe da Secção de Barragens do U.S.Bureau of Reclamation(1), e conforme nós próprios temos tido ocasião de constatar consistentemente, em caso após caso, nas dezenas de locais de barragens a que temos estado ligados em algum estudo ou projeto, os locais tidos como topogràficamente mais apropriados para a construção de barragens e aproveitamentos hidrelétricos, sempre abrangem descontinuidades geológicas associadas às feições topográficas que tornaram o local mais interessante (corredeiras e cotovelos no curso do rio, encostas escarpadas, etc.). Finalmente, a degradação e peneplanização, é a tendência natural a longo prazo, mesmo que tais prazos se meçam à escala geologica, e a criação de descontinuidades físicas é, portanto, intrìnsecamente contrária à natureza.

Em vista destas considerações, não é de extranhar portanto, que segundo um levantamento recente abrangendo 1764 barragens de todos os tipos, de altura de mais do que 30 metros, os casos de ruturas, num total geral de cêrca de 1,8% dos casos considerados, tenham compreendido 40% de casos por causas atribuíveis a deficiências de fundações, e 23% de casos por deficiências de sangradouros(2).

Os dois fatôres assim implícitos, o geológico e hidrológico, compreendem os principais setores da imprevisibilidade da natureza, perante as obras de represamento. Entre os dois, julgamos que se deva prever acentuar-se cada vez mais a preponderância do primeiro, pois que não só a gradativa regularização de um curso d'água passará a reduzir os efeitos de enchentes, como também o atendimento aos riscos respectivos pode ser alcançado em obras da superestrutura em que a introdução

de maiores coeficientes de segurança depende apenas de decisão em função de problemas econômicos, alteráveis, conforme necessário se o desenvolvimento da região a jusante o justificar. Em contraposição, com relação ao fator geológico, podemos afirmar que a natureza não esbanja coeficientes de segurança, isto é, em linhas gerais, na tendência à peneplanização, a topografia regional num dado momento exprime aproximadamente as inclinações máximas estáveis correspondentes ao pior conjunto de fatores de instabilidade já sofrido: consequentemente, quando tal conjunto de fatores é agravado, às vêzes por nada mais do que a passagem significativa do tempo ou a ocorrência de condições inusitadas de elevação do lençol freático ou de exageradas infiltrações pluviométricas, o equilíbrio poderá ser fàcilmente rompido; neste sentido, convém lembrar que o aproveitamento de locais menos e menos favoráveis, e a construção de obras de maior e maior porte, frequentemente de escala comparável com a dos acidentes naturais, constitui evidência da proporção em que o homem virá a interferir em equilíbrios geológicos locais, transitòriamente estáveis.

Dentro de tais perspectivas, permitimo-nos estranhar que num recente trabalho em que se discutem acidentes de barragens(3), o eminente consultor, Gruner, tenha declarado que "na maioria dos casos a rutura ocorreu porque o conhecimento disponível na ocasião do acontecimento provou ser incompleto". Pois a nosso ver, esta própria frase tem implícita uma conceituação que leva no seu bôjo o convite a eventuais acidentes catastróficos. Observe-se como difere da conceituação implícita no que Terzaghi escreveu a Coyne(4), com relação à rutura da barragem de Malpasset: "Porém, todo o engenheiro de bom senso se lembrará de que ruturas dêste tipo são infelizmente elos essenciais e inevitáveis na cadeia do progresso no campo da engenharia, porquanto não existem outros meios para se detectar os limites de validês de nossos conceitos e processos... Tendo-o conhecido bem por muitos anos, sinto-me confiante em que a rutura não foi consequência de um êrro em seu projeto. Portanto, servirá à finalidade vital de revelar um fator que no passado não recebeu a atenção que requer".

O imprevisto é inevitável, simplesmente porque não somos capazes de aceitar a hipótese filosófica de uma culminação do saber. Quando forem previstos e atendidos todos os fatores conhecidos ou suspeitáveis em função da experiência coligida até 1965, aparecerão os fatores novos que constituirão a experiência adicional de 1966, e assim por diante. O próprio decorrer do tempo é, para muitos aspectos, um fato novo. Outrossim, ca

da caso novo constitui uma oportunidade adicional de surgirem fatos novos. Reconhecidamente, dentro de um universo estatístico os casos novos puramente aleatórios acarretam menor e menor influência na redefinição do universo em seus comportamentos médios, porém, cabe lembrar que os acontecimentos do tipo em apreço geralmente não dependem do campo médio, mas sim, dos campos extremos, do universo estatístico postulado. E, finalmente reconheçamos que os casos novos contìnuamente enfrentados, difìcilmente pertenceriam a um mesmo universo por motivos diversos, entre êles, o de que estamos sujeitos à inescapável necessidade e tendência consciente de progredir, de alargar as fronteiras.

Consideramos, portanto, parte da própria função do engenheiro de barragens projetar não só para o previsto e previsível, mas também para os imprevistos previsíveis. Isto é, a nosso ver, não poderemos jamais evitar acidentes no sentido atenuado de imprevistos: o importante é pretender evitar o acidente catastrófico.

Para tal fim, a nosso ver, o importante é cuidarmos da criação de uma nova mentalidade técnico-profissional. A conceituação implícita na frase de Gruner decorrente dos raciocínios mecanísticos e matemático-simplistas, das relações causa-efeito entre parâmetros individuais e predominantes, com que se pôde ordenar o mundo da ciência dentro da complexidade da experiência natural, passa a ser perigosa no mundo moderno em que os parâmetros de segunda e terceira ordem, gradativamente, se revelam. Se a cada rutura a conclusão é de que na ocasião os conhecimentos eram incompletos, a lógica é de que existiria "o conhecimento completo" .... possìvelmente na mente e na auto-apreciação de cada um, até que barragem de algum colega viesse a sofrer um eventual acidente, por motivo de algum outro desconhecimento...

Ocorre-nos louvar a iniciativa atual da Associação Brasileira de Normas Técnicas, do Comité Brasileiro de Grandes Barragens e da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, da elaboração de uma norma brasileira de projeto e construção de barragens. Permitimo-nos, ao ensejo, dar ênfase ao fato de que primordial e concomitantemente o indispensável é promovermos um modo de pensar e de agir perante tais obras.

Passaremos em revista rápida, à base de publicações categorizadas, alguns casos de acidentes em barragens, através dos quais a especialidade aprendeu lições importantes.

OFERECE
VICTOR F. B. DE MELLO

1)-BARRAGEM DE FORT PECK (4)(5)

A barragem de Fort Peck, com cêrca de 6,4 km de comprimento, 70 m de altura e 100 milhões de metros cúbicos de atêrro hidráulico, estava em fase final de construção e com um represamento parcial (20m), quando (1938) parte de seu talude de montante, numa extensão de cêrca de 500m compreendendo um volume da ordem de 6,5 milhões de metros cúbicos, sofreu um escorregamento súbito.

Apoiava-se sôbre aluviões constituidos predominantemente de areias, numa espessura da ordem de 40 m sob o trecho que escorregou, e estas, por sua vez, sôbre o folhelho de Bearpaw, originalmente tomado como substrato rochoso insuspeitável.

As características da rutura foram sob muitos aspectos surpreendentes, compreendendo um deslocamento médio de cêrca de 450m em poucos minutos, do qual resultou abater o talude médio inicial de cêrca de 1 : 5 para taludes da ordem de 1 : 20 a 1 : 30, embora grandes partes da massa tivessem remanescido como imensos blocos intactos, e uma investigação especial da dinâmica do escorregamento concluiu que o coeficiente de atrito médio durante o evento teria sido da ordem de 4°20'.Em resumo, concluiu-se que a rutura só poderia ser explicada pelo fenômeno da liquefação das areias. Descobriu-se que o folhelho possuia delgadas lentes de bentonita que teriam dado início a deformações cisalhantes ; como quer que fôssem originadas, sob as deformações cisalhantes em curso, as areias fôfas saturadas, sujeitas à redução acentuada de volume no cisalhamento e incapazes de drenar com suficiente rapidêz para dissipar as pressões neutras respectivas, teriam sofrido a grave perda de pressão efetiva e consequente rutura por liquefação.

A subsequente preocupação por êste fenômeno,novo na especialidade, norteou os extensos e minuciosos estudos, investigando e definindo os"índices de vazios críticos" para estabelecer as exigências mínimas de compactação das areias fôfas e, sob certos aspectos,acabou com o emprêgo de barragens de construção hidráulica, alertando dos riscos da construção com e sôbre areias fôfas saturadas. Lembra-nos, o magistral artigo de Casagrande(4) que Hazen já havia descrito muito claramente, embora em têrmos qualitativos, os problemas da possível liquefação das areias em tais obras, no artigo "Hydraulic Fill Dams", Transactions A.S.C.E., Vol. 83, 1920.

2)-BARRAGEM DE MALPASSET (6)(7)

A rutura da barragem de Malpasset, barragem em arco, de cêrca de 60 m de altura, com espessuras de 1,5 m no tôpo e 6,8m na base, projetada e construida sob os melhores cuidados e os mais competentes profissionais, também se prende ao motivo de imprevistos de ordem geológica.

As investigações geológicas prévias ao projeto haviam sido conduzidas sob a hipótese da execução de uma barragem de gravidade, ou sem indicação de qual o tipo de barragem que os projetistas contavam adotar. O relatório do geólogo, consultor independente, assinalou preocupação pelo fato de que o gnaisse local apresentava intrusões de pegmatito (realmente, não tiveram a importância temida), que as rochas, predominantemente carboníferas na região, indicavam mergulhos para jusante no local da barragem, e que o gnaisse possuia muito fissuramento fino num espaçamento máximo da ordem de 5 cm (perante o qual foi recomendada a injeção intensiva). O projeto foi criteriosamente analisado sob diversas hipóteses de relação de módulos de elasticidade, do concreto para com a rocha de apoio, admitindo para esta relação o valor máximo de 10 a refletir a pior qualidade de rocha presumida. Os esforços cisalhantes máximos no encontro esquerdo, alcançando o valor de 9 kg/cm^2, conjugados a uma tensão normal de 6 kg/cm^2, foram tidos como satisfatórios por comparação com as resistências de aderência concreto-rocha determinadas por ensaios procedidos na barragem de Grandval (s = 28 + + 1,3 kg/cm^2). E, após um programa de injeções em furos espaçados de 2,5, com pequenas tomadas de caldas, concluiu-se que a rocha era essencialmente impermeável e que o prosseguimento das injeções seria infrutífero.

As análises da rutura ocorrida (dezembro de 1959) revelaram como característica predominante o cisalhamento na rocha, segundo um plano preferencial ao longo da ombreira esquerda, situado um pouco abaixo do apoio.

As opiniões evidentemente divergem um tanto quanto à verdadeira sequência dos sintomas, uns achando que a estabilidade da rocha de apoio da ombreira esquerda teria sido mais desfavorável pela presença de sericita no gnaisse (registrada apenas naquela ombreira), outros postulando que as infiltrações d'água e subpressões na ombreira teriam constituido a causa básica da catástrofe, ainda outros achando que o fato decorreu da existência, indetectável dentro da constatação geral de múltiplos fissuramentos e diaclasamentos de menor escala,

de uma junta abrangendo grande proporção de extensão da própria superfície final de cisalhamento; e, por fim, segundo uma interpretação mais recente, postula-se que após deformações apreciáveis de carga-descarga a rocha tenha naturalmente sofrido a acentuada perda de resistência ao cisalhamento, (associada ao "strain-softening") ao longo do plano preferencial macroscópico potencial. À base do exame do local e dos dados publicados, julgamos pessoalmente que poderão ter havido motivos puramente estatísticos da formação geológica local pela existência de extenso plano preferencial de cisalhamento, ou que, na rocha já fissurada em pequenas juntas a criação de tal plano poderá ter sido favorecida por fatores diversos, tais como as escavações das fundações e as injeções; porém, ao longo de tal plano potencial, a perda de resistência associada às deformações acentuadas constituiria uma explicação muito plausível do desenvolvimento do processo, considerando que, segundo as análises da "Comissão de Investigação", as deformações do pé da barragem sob enchimentos parciais de cêrca de 40 m e 52 m alcançados em 1955 em início de 1959, teriam correspondido a módulos de elasticidade da rocha de ordem de 1/15 a 1/25 do módulo do concreto, sem que tal fato tivesse induzido tensões anormais no concreto. Ensaios de deformabilidade da rocha procedidos em duas galerias após a rutura revelaram módulos de elasticidade variando entre 2.300 a 8.000 kg/cm^2, muito inferiores ao que é tido como admissível para um gnaisse, e as deformações registradas no encontro esquerdo chegaram a cêrca de 2 metros momentos antes da rutura.

Diversas terão sido, e serão, para muitos, as lições técnicas extraidas da rutura em apreço. Ressaltamos porém duas que nos parecem mais gerais: uma, a das insuficiências que podem ocorrer na elaboração de um projeto, devido às lacunas de comunicação entre consultores independentes e as equipes projetistas, e, particularmente, devido às deficiências de linguagem adequada de comunicações entre especialidades tão distantes quanto a geologia e a engenharia estrutural de barragens em arco. A outra, apontada por Terzaghi, resume-se no conceito de que uma investigação mais avançada talvez não tivesse acrescentado informações significativas à apreciação da segurança da rocha da ombreira esquerda, porque os furos de sondagem teriam interceptado não sòmente a junta fatal mas também várias outras, preenchidas ou não por argila, nada se podendo concluir sôbre sua continuidade, e, em contrapartida, os levantamentos pormenorizados de diaclases no local, teriam provido informações sôbre as direções preferen-

ciais de menores resistências ao cisalhamento, sem porém aduzirem quaisquer informações sôbre as resistências efetivas ao longo dessas direções ou de planos de rutura que as acompanham em parte.

3)-REPRÊSA DE VAJONT

Todos os fatos com relação ao projeto e à construção da barragem de Vajont, assim como, finalmente, a própria catástrofe ocorrida em sua reprêsa em outubro de 1963, são de escala tão superlativa que indubitàvelmente desmerecemô-los ao tentar resumi-los em poucas linhas(8). O caso por um lado serviu para provar que a barragem mais alta do mundo -265m-, executada em arco esbelto num canyon de rochas cuidadosamente tratadas para o apoio desejado, constituiu um projeto estrutural maravilhoso. De outro lado trouxe-nos amargamente a lição de que todos os problemas da reprêsa fazem parte da preocupação direta do engenheiro de barragens, e de que, perante os fenômenos que se desencadeiam à escala geológica, nossas possibilidades de previsão e contrôle, e as próprias proporções de nossas obras e intenções, mesmo quando grandiosas, continuam insignificantes.

Em resumo, a geologia local compreende principalmente um vale glacial amplo de cêrca de 1 000 m de profundidade, contido num sinclinal de rochas calcáreas em taludes da ordem de 40 a 45°. As rochas foram fortemente fraturadas não só pela tectônica, mas também, em superfícies essencialmente paralelas à topografia do vale glacial por alívios das tensões verticais. Após a última glaciação o rio erodiu ràpidamente (18.000 anos) o "canyon" em V até profundidades da ordem de 250 a 350m abaixo do vale mais amplo: esta velocidade da erosão, muito grande, provocou novas tensões de alívio de sobrecarga, com seus intensos fraturamentos. Todo o pacote de rochas é fortemente atacado pela decomposição, resultando ora em canais de solução e dolinas, ora em camadas argilosas, ora em afundamentos superficiais: todos êsses fatôres contribuiam para a aceleração das infiltrações e do processo de decomposição.

Era amplamente reconhecido, portanto, que tôda a região está permanentemente sujeita a escorregamentos periódicos. No próprio local em apreço, na margem esquerda da reprêsa e próximo à barragem, ocorrera em 1960, um escorregamento de cêrca de 1 milhão de metros cúbicos, conjugado com um movimento de rastejo e o aparecimento de fendas superficiais, em área circundante muito mais ampla (cêrca de 1,5 x 2 km). Êsses fatos tinham motivado intensos trabalhos de observação dos movimentos, al-

gumas sondagens de investigações (90 m - demasiado curtas, vistas em retrospecto), alguns trabalhos de estabilização, e grande número de precauções, tais como a de manutenção da reprêsa uns 20m mais abaixo, em parte por motivo da estimativa de que um escorregamento poderia provocar uma onda de 20m, estimativa esta baseada na onda provocada na barragem de Pontesi, 1959, em vale vizinho, por motivo análogo. De fato já se havia concluido alguns mêses antes da catástrofe que uma massa de cêrca de 200 milhões de metros cúbicos de rocha, alcançando profundidades de 50 a 500 m, estaria em movimento, provocando sismos locais.

Possìvelmente as intensas chuvas, que começaram uns 10 dias antes da catástrofe, tenham sido a causa direta do fim. Possìvelmente tenha ocorrido também neste caso o fenômeno de uma violenta perda de resistência devido às exageradas deformações. O fato é que a massa de 200 milhões de metros cúbicos (a reprêsa tinha 150 milhões de metros cúbicos de água) escorregou em poucos segundos numa violência impossível de se imaginar, provocando sismos que foram registrados em diversas capitais européias, e causando destruição e mortes (3.000) em vilarejos à beira da reprêsa e do rio quilometros a jusante, primeiro por uma violenta onda de compressão de ar, e a seguir por uma devastadora onda de água que passou com cêrca de 150 m sôbre a crista da barragem.

Em resumo, as principais perguntas que surgem são: (1) O escorregamento teria ou não ocorrido independentemente da reprêsa? Julgamos que a resposta é positiva mesmo que admitamos que o represamento com seus efeitos sôbre o lençol d'água, possa ter agravado a instabilidade, encurtando a vida provável da encosta. (2) O que sabemos sôbre a transformação de um movimento de rastejo em escorregamento rápido, e sôbre a velocidade provável de escorregamento? Pràticamente nada.

4)-BARRAGEM DE BALDWIN HILLS

O projeto (1940-'46), a construção (1947-'51), e a observação do comportamento (1951-'63) da barragem de terra de Baldwin Hills, California, foram inteiramente conduzidos sob o reconhecimento ponderado de que o local apresentava problemas importantes de ordem geológica e geotécnica, que todavia, se esperava controlar e superar mediante cuidados técnicos, visto que a localização do reservatório respectivo para o abastecimento d'água da cidade de Los Angeles amplamente justificaria todos os cuidados adicionais vislumbrados.

Os dois principais fatores de preocupação na fa-

se de projeto foram (1) a localização do reservatório muito próximo da falha de Inglewood, considerada uma das mais ativas da Califórnia, o que motivou projetar-se as obras para sismo de aceleração horizontal de 0,2g (2) a natureza dos terrenos de apoio do reservatório, extremamente permeáveis, sujeitos à subsidência acentuada por motivo de encharcamento, e fortemente sujeitos à erosão (propriedades típicas de "loess", ou de siltes argilosos sedimentares ressecados).

O projeto se orientou no sentido de evitar o contacto da água com o terreno de apoio. Assim, tôda a barragem foi revestida de conjunto de camadas de dupla finalidade, de impermeabilização, e, subjacente, de drenagem de tôda água de percolação eventual, evitando seu contacto com os solos de fundação. No tôpo, um pavimento asfáltico de 3 polegadas de espessura, para proteção superficial: a seguir, camada impermeabilizante de terra compactada em espessura variável entre 3m e 1,5m; a seguir uma camada drenante de 4 polegadas de pedregulhos cimentados, porém porosa, e um sistema de coletores de manilhas: por fim, sob a camada drenante, e sôbre o terreno de fundação, uma membrana asfáltica de 1/4 de polegada.

A construção foi esmeradamente fiscalizada. Registre-se que durante as escavações foram constatadas cinco falhas menores atravessando a área do reservatório, e tôdas foram tratadas com escavação até pouca profundidade, e reenchimento em terra compactada.

O comportamento do sistema de impermeabilização e drenagem do reservatório apresentou problemas desde o início da operação; os vazamentos foram grandes, em ocasiões errático, no início houve descarga de quantidades substanciais de asfalto, a seguir houve sérios problemas de obstrução dos drenos com depósitos de carbonato de cálcio; em resumo, porém, além de esvaziamentos do reservatório para reparos, e de intensos programas de observações e de desobstrução, nada de dramático se registrou até poucas horas da rutura, quando o primeiro indício de anomalia foi o barulho da água em fuga violenta por um dos drenos.

A rutura se deu ràpidamente pela erosão que abriu uma grande brecha pela barragem junto a uma ombreira, num ponto em que o desenvolvimento da crista era contíguo a uma curva fechada, côncava para montante, e em que também coincidiu situar-se uma das cinco falhas inativas acima mencionadas. Perante a sequência dos acontecimentos da rutura caberia estranhar que, considerando tôdas as precauções tomadas no projeto com relação às condições desfavoráveis do local, as mesmas

não tivessem se estendido para a incorporação de uma maior capacidade de descarga de fundo que permitisse um esvaziamento significativo.

Na análise das causas da rutura ressalta como fator importante o fato de que a região ficava muito próxima a um campo petrolífero e sujeita à subsidência geral, que a partir de 1958 havia sido combatida parcialmente pela técnica de injeções de água do mar, porém, teria alcançado valores variando entre 1 e 2 m ao longo da extensão do reservatório. As velocidades de subsidência no local teriam alcançado valores da ordem de 6 a 8 cm por ano, e as subsidências diferenciais específicas na extensão do reservatório valores de 3:1 000 aparentemente pequenos, mas que, por situar-se a obra próximo à periferia da tigela de subsidência, correspondiam à faixa em que ocorrem alongamentos da superfície do terreno (concluiu-se terem ocorrido na ordem de dezenas de centímetros durante a vida do reservatório). Além dêstes movimentos regionais, o trecho da barragem em que se localizou a brecha chegou a sofrer recalques diferenciais específicos máximos da ordem de 1:200, o que terá indubitàvelmente agravado a tendência de fissuramento.

Concluiu-se pois que as infiltrações através das camadas impermeabilizantes teriam ocorrido por muito tempo, servindo-se das falhas tectônicas para a fuga despercebida da água, acompanhada de algum carreamento sólido e a formação de cavernas locais. Sòmente quando essas cavernas alcançaram dimensões maiores é que ocorreu o colapso da camada de revestimento que podia até certo ponto galgar os vãos menores por sua relativa rigides. Uma vez ocorrido o colapso as erosões se precipitaram de forma catastrófica.

Foram evidentemente vários os motivos da rutura, particularmente concentrados em tôrno do desconhecimento atual de problemas de fissuramentos de rochas e maciços terrosos, e de movimentos ao longo de fissuras, quer por motivos tectônicos, quer por subsidência regional, quer por causa de recalques diferenciais, quer ainda por tendências de alongamentos e trações. Convém ressaltar porém o fato irônico de que os cuidados do tratamento de impermeabilização, que intrìnsecamente nunca poderiam ser absolutamente perfeitos, serviram até certo ponto para encobrir as fases inciais dos danos, de forma que a sua evolução perceptível final foi catastrófica.

5)-BARRAGEM DE MANSFIELD E OUTRAS, AUSTRÁLIA

Analisando as ruturas de diversas barragens Australianas de argilas compactadas, Aitchison e seu grupo (10) concluiram que um dos fatores que tem contribuido em grande escala para ruturas por entubamento hidráulico ("piping"), é o equilíbrio iônico da água da reprêsa em comparação com o da argila, na qual pode provocar a defloculação ou floculação nocivas. Estabelece um gráfico indicando de acôrdo com a capacidade de troca catiônica da argila quais os teores de eletrólitos-(mili-equivalentes por litro)-da água da reprêsa que constituiriam perigo para o desenvolvimento do "piping".

Constitui indubitàvelmente um fator do qual o engenheiro civil difìcilmente suspeitaria ao discutir a segurança de barragens.

Dos poucos casos acima resumidos, e de tôda a literatura congênere, concluimos evidentemente que cada caso constituiu uma lição técnica. Mas quais seriam as lições comuns a todos os casos?

Julgamos dever salientar dois pontos básicos:por um lado é importante desenvolver-se mentalidade profissional que reduza ao mínimo as tendências de se julgar prematuramente, que tudo está previsto e equacionado ; por outro lado é imprescindível manter as portas abertas, o tanto quanto possível, para a vigilância da obra e para seus consertos, como postergações naturais e intrínsecas da fase de projeto.

Com relação ao primeiro, podemos resumir alguns requisitos que nos parecem intrínsecos à conceituação técnico-profissional moderna:

1)-em primeiro lugar, é indispensável partir do princípio de que um dado fenômeno ou comportamento, tudo influi, salvo prova convincente de que a influência seja desprezível; note-se a significativa diferença em comparação com a mentalidade, que derivou dos primeiros passos da investigação científica,em função da qual em determinado comportamento cada novo parâmetro de influência ia sendo investigado e estabelecido como se fôsse o único, ou único adicional aos anteriormente estabelecidos. Por exemplo,na investigação da compressibilidade das argilas a especialidade foi gradativamente estabelecendo que o índice de compressão K depende do tipo de argila (A), da estrutura da argila E, do índice de vazios de amassamento (B), do líquido intersticial (L), do teor catiônico do líquido (C), das cargas elétricas coloidais (Q), da temperatura (T), da pressão média

a que está sujeita (p) e do valor do carregamento - (Δ p); na primeira dessas investigações, conduzidas sob variações de apenas um parâmetro para observa — ção do efeito causado, pouco ou nada se registrava sôbre os demais parâmetros de cuja interferência nem se suspeitava. Em comparação, sob a mentalidade moderna a investigação começaria admitindo que K = = f(A, E, B, L, C, Q, T, p, Δp, M, N, X, Y, Z) todos parâmetros dos mais remotamente capazes de alguma interferência: assim, quando se desejasse pesquisar K = f(A), ter-se-ia a preocupação de manter constantes, e sob registro adequado, os demais parâmetros.

2)-em segundo lugar, cada parâmetro de influência, no comportamento em estudo possui sua faixa estatística, distinta, de êrro e imprecisões e de desconhecimento, de modo que para uma apreciação adequada de um comportamento conjunto é indispensável tentar a decomposição analítica respectiva de forma a permitir que se aplique a cada parâmetro o coeficiente de segurança apropriado respectivo, criteriosamente selecionado para ser significativo. Citamos como exemplo dêste ponto, brilhantemente postulado por Manuel Rocha (11), a necessidade de se decompor a resistência da rocha em fatores intrínsecos de coesão C e de ângulo de atrito φ , aplicando-se para o primeiro coeficientes de segurança altos (da ordem de 5) por motivo de sua grande variabilidade de acôrdo com as juntas, e para o segundo sendo geralmente suficiente um coeficiente muito menor, da ordem de 1,5.

3)-em terceiro lugar é indispensável distinguir entre fatores cujos efeitos são cumulativos ou integrados, dependendo portanto de valores médios e os que se desenvolvem por efeitos progressivos iniciados em função de comportamentos da estatística dos extremos. Neste sentido pressentimos que estamos necessitando uma ampla reformulação dos próprios conceitos de coeficientes de segurança. Por exemplo, um problema de erosão regressiva pode fàcilmente se iniciar com o carreamento de uma partícula criticamente situada e sujeita aos efeitos estatìsticamente - mais desfavoráveis do fluxo: em contraposição, um escorregamento de talude num material em que a curva tensão-deformação não exiba um pico acentuado, será indubitàvelmente controlado enquanto a média das tensões não ultrapasse a média das resistências.

4)-em quarto lugar, recomenda-se que perante cada problema em apreciação, após relacionados todos os pa-

râmetros prováveis, plausíveis e remotos, capazes de influirem (conforme sugerido acima), se faça um amplo, ponderado e honesto exame de consciência para se estabelecer (a)-o que realmente se conhece, por dados quantitativos de experimentação ou de observação de obras, com relação à interferência de cada parâmetro no comportamento em exame; (b)-o que se admitirá por extrapolação dos dados experimentais, ou observacionais de fato, e (c)-o que se tem por intuitivo, sem as bases experimentais ou observacionais reais.

É impressionante notar-se quão frequentemente uma nova descoberta se deve ao simples fato de que alguém honestamente desconfiou não se saber nada sôbre determinado assunto que era tido como intuitivo. Um exemplo que nos vem à mente é o caso da barragem de terra-enrocamento Européia(12) com o maciço de enrocamento de montante constuido de material morâinico, de granulometria contínua variando entre 1 m e 0,05mm, compactado a densidades aparentes sêcas da ordem de 2,2 t/m^3 ; considerando ciclos de abaixamento do nível da reprêsa em cêrca de 6 meses ou a razão de cêrca de 0,3 metros por dia, a intuição levaria a crer que a drenagem do enrocamento seria suficientemente rápida para evitar a ocorrência de pressões neutras no maciço (shell) de montante durante os esvaziamentos operacionais da reprêsa; todavia, ensaios procedidos empregando modêlo de líquidos viscosos revelaram que as pressões neutras remanescentes do abaixamento em apreço seriam da ordem de 10% da carga hidrostática máxima, o que tornava interessante empregar processos construtivos especiais para aumentar a permeabilidade e drenagem da base de tal enrocamento. Um outro exemplo que podemos citar é a descoberta recente de Bishop(13) de que as argilas podem sofrer acentuada diminuição do ângulo de atrito φ , lento, ao serem ensaiadas sob elevadas pressões normais ; anteriormente existia o fato de que as argilas costumavam fornecer envoltórias de resistência efetiva $s = c + \sigma' \operatorname{tg} \varphi$ em que c era pràticamente nulo e φ pràticamente constante; mas êste fato restringia-se realmente à investigação em argila normalmente adensada, sob pressões até 7 kg/cm^2; quando se passou a pesquisar sob pressões muito mais elevadas verificou-se que o ângulo de atrito verdadeiro da argila de Londres anteriormente estabelecido como 28°, realmente cairia gradativamente, sob pressões entre 35 e 50 kg/cm^2, chegando a 10° com um aumento concomitante do intercepto de coesão até valores da ordem de 7 kg/cm^2. Observem-se as implicações de tal descoberta perante a discussão de problemas tais como o de Vajont, em que, se admitimos terem

existido zonas argilosas, devemos reconhecer que as argilas estariam sob pressões efetivas da ordem de 25 kg/cm^2, ou mesmo perante o projeto de barragens tais como a de Nurek em que com seus 300m pretendidos a argila do núcleo poderá ser solicitada a 30 kg/cm^2, ou mais, de pressão efetiva.

A nosso ver foi interessante a atitude profissional que segundo nos consta teria norteado a fase de ante projeto da barragem de Paradela, em que os estudos de viabilidade teriam indicado a possibilidade de se projetar para uma altura quer de cêrca de 110m, quer de cêrca de 125m; após um levantamento minucioso das barragens de enrocamento análogas já construidas no mundo, ter-se-ia resolvido ficar com a altura máxima de cêrca de 110m que representaria uma extrapolação de não mais do que 10% sôbre a experiência mundial da época. Lembremo-nos que apesar das precauções a barragem apresentou problemas, requerendo seu esvaziamento para reparos.

Por fim, citamos como exemplo de uma intuição, ainda fracamente promovida de comprovação experimental, específica, que vem sendo citada e usada, possìvelmente em grau de abuso que poderá levar alguns casos a consequências desfavoráveis, a busca da "plastificação" de argilas compactadas de núcleo de barragens através do emprêgo de umidades nìtidamente mais elevadas do que a "ótima" de compactação, da amplíssima experiência mundial atual. Busca-se assim evitar os fissuramentos que ocorreriam devido a recalques, recalques diferenciais, e demais deformações do maciço. A intuição baseia-se em fatos tais como: a prática inglêsa de barragens empregando os núcleos de argila quase fluída (puddled clay cores); o teor de umidade um tanto acima do ótimo de Proctor situa-se, em geral, acima do limite de plasticidade de Atterberg da argila; uma argila compactada acima do ótimo geralmente dá, em ensaio de cisalhamento, curvas tensão-deformação com extenso plateau em comparação com a mesma argila compactada do lado sêco, que tende a dar curva com pico acentuado a pequena deformação específica, característica de materiais "friáveis". Ora, examinando mais a fundo o problema, veremos que o ensaio de limite de plasticidade de Atterberg, procedido sôbre uma amostra inicialmente amassada com teor de umidade muito superior (próximo do limite de liquides) mede, de uma forma arbitrária e pouco precisa, a plasticidade do solo sob pressões totais e neutras essencialmente nulas, nada tendo de correlacionável com o comportamento plástico de um solo compactado com teores de umidade próximos do próprio LP, e posteriormente sujeito a certa parcela de efeitos tixotrópico-estruturais.

de tempo e a deformação lenta sob elevadas pressões. Outrossim, o plateau da curva tensão-deformação tem muito pouca correlação com o comportamento essencialmente elástico, e não muito diferente na amostra mais sêca e mais úmida, no trecho das curvas a que se restringem as tensões nos maciços de terra por motivo dos coeficientes de segurança que sempre vigoram. Por fim, se com maiores teores de umidade favorecemos a adaptação às deformações diferenciais lentas do maciço, por outro lado frequentemente ocorre que nas argilas essas mesmas umidades altas de compactação favorecem a laminação e o fissuramento do maciço durante a compressão por equipamento e rolos demasiado pesados para as capacidades de suporte respectivas, além de poderem aumentar um tanto as tendências de assentamentos por aumento de compressibilidade e das pressões neutras de construção e de poderem favorecer o enrijecimento tixotrópico-estrutural sob efeitos do tempo. Em nossa experiência concluímos portanto, que nada realmente é sabido sôbre o assunto, e admitimos que em muitos casos a maior umidade de compactação pode agravar ao invéz de atenuar, em seu conjunto, os problemas de percolamento preferencial através dos núcleos.

Em relação ao segundo ponto básico que extraímos como lição comum de todos os acidentes, podemos resumir os seguintes requisitos:

1-É indispensável reconhecer que a barragem constitui uma obra viva, na qual é necessário preservar a unidade orgânica no espaço, no tempo, e na conceituação de responsabilidade da obra. Não são insuperáveis as dificuldades de se projetar uma barragem para qualquer condição, por mais desfavorável que seja (14): porém, o problema sério reside no reconhecimento do comportamento conjunto do elemento descontínuo infra estrutura-superestrutura, isto é, fundações e obra sobrejacente. Temendo descontinuidades, reconhecemos que devem ser considerados conjunta e simultâneamente todos os fatores que constituem, com a barragem pròpriamente dita, a unidade orgânica no espaço, por afetarem suas condições de segurança. Tais fatores compreendem, indispensàvelmente, (a) a bacia da reprêsa, (b) os terrenos de apoio como prolongamentos da superestrutura, (c) os dispositivos de observação do comportamento funcional, e os da vigilância na operação e no contrôle técnico da estrutura, (d) os sangradores, as descargas de fundo, e as tomadas d'água, os sistemas de impermeabilização e de drenagem, (f) as instala-

ções de comunicação e manutenção.

O conceito de unidade nas fases da vida da obra reconhece que a despeito de existirem no mínimo cinco fases distintas de importância, é indispensável à garantia do bom comportamento da obra evitar as descontinuidades correspondentes à separação destas fases em compartimentos estanques. As fases são denominadas de acôrdo com a atividade predominante em cada uma: projeto, construção, ensaio de enchimento, primeiros anos de exploração, (digamos 5), e exploração a longo prazo (vida útil). Convém reconhecer, porém, que cada uma das fases iniciais se estende obrigatòriamente pelas demais. Certos pormenores de projeto só podem ser corretamente formulados nas fases subsequentes, de construção em diante; certos pormenores construtivos podem ser consciente e convenientemente deferidos para as fases posteriores, ou mesmo, os trabalhos construtivos complementares e de reparos fazem parte integrante da construção da obra. Julgamos, importante, ressaltar que as possibilidades de acidentes ou catástrofes poderão ser um tanto diminuidas, mas definitivamente não podem ser eliminadas, em se aumentando os coeficientes de segurança numéricos, calculados, visto que êstes o são sempre para problemas ou danos previsíveis e previstos enquanto que o acidente em discussão decorre da imprevisibilidade. Assim, a opção de elaboração de um projeto mais conservador não pode ser encarada como substitutiva ao acompanhamento da construção, e do ensaio de enchimento, e mesmo dos primeiros ciclos completos de operação da reprêsa, por parte dos projetistas.

Por fim, dentro do requisito da unidade de conceituação de responsabilidade da obra julgamos interessante mencionar algumas das prescrições da norma recomendada do Comité Espanhol de Grandes Barragens(15), na qual ficam patentes as interligações íntimas, indispensáveis, entre as observações do comportamento da obra, e as medidas controladoras e corretivas que se admite tenham sido incorporadas ao projeto. Recomenda-se que se observe como indispensável à segurança da obra: (a) o conhecimento e a possibilidade de contrôle, a todo momento, das solicitações a que ficará sujeita a estrutura ; (b) o ajuste entre solicitações e capacidades de resistência; (c) a comprovação do comporta-

mento da estrutura, e de sua semelhança com as hipóteses de projeto; (d) a previsão ponderada de possíveis anomalias, e a indicação dos meios para sua correção. "Do melhor ou pior cumprimento dêstes quatro princípios depende o grau de contrôle da barragem pelo homem, e, consequentemente, sua segurança: ..... sòmente quando a barragem é objeto de preocupação constante do homem se consegue a obra perfeita"(16). Indubitàvelmente reconhecemos a impraticabilidade, em certos casos, da estrita observância destas prescrições: em tais casos, precisamente, deverão ser acentuadas as demais proteções do projeto para a compensação pelas lacunas inseparáveis.

2-O segundo princípio fundamental compreenderá o aproveitamento integral das virtudes da especialização e das consultorias individuais, sem os vícios concomitantes da compartimentalização ou da perda de perspectiva global. A atividade complexa de projeto destas obras requer a conjugação de esforços em equipe, em que é indispensável valorizar os especialistas, mas não é menos importante a função do engenheiro-chefe do projeto, como a de um regente de orquestra.

E, finalmente, para que não se corra o risco de passarem despercebidos certos problemas menos aparentes, recomenda-se a interveniência de consultores, de tempos em tempos. Nos setores da geologia e mecânica dos solos jamais se repetem condições enfrentadas em casos anteriores, salvo em aparências de primeira aproximação. Exige-se um faro de detetive, que a experiência diversificada permite ao especialista consultor adquirir, em função do qual os pequenos indícios são interpretados de forma a atinar com as peculiaridades de cada caso - peculiaridades essas que promovem tôda a diferença entre um bom e um mau projeto, uma obra mais cara ou mais econômica, uma obra com grandes probabilidades de bom comportamento e as fadadas ao mau comportamento ou a eventuais acidentes. Em suma, julgamos que faz parte integrante da conceituação moderna de projeto e construção de barragens, a participação de uma junta de consultores em reiterados contactos com a equipe de projetistas. Salientamos o interêsse em se introduzir entre nós o reconhecimento do valor da interveniência de uma junta de consultores, não só em comparação com a inexistência

qualquer consultoria, mas também, em comparação com consultorias individuais sucessivas.

***

R E F E R Ê N C I A S

1-Walker, F.C. "Development of earth dam design in the Bureau of Reclamation", Denver, USDI, 1958.

2-Bernard, Emilio Casal. "El mundo de las grandes presas, constataciones y de actualidad". Revista de Obras Públicas, Madrid, abril 1961, p.204, mayo 1961, p.255.

3-Gruner, E. "Dam Disasters". Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol.24, Paper 6648, p.47.

4-Casagrande, Arthur. "Role of the calculated risk in earthwork and foundation engineering", Terzaghi Lecture, Journal Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, July 1965, Vol.91, SM4,p.1.

5-Middlebrooks, T.A. "Fort Peck Slide", Transactions , ASCE 1942, Vol.107, p.723.

6-Ministère de l'Agriculture, (France) - Comission d'enquête du Barrage de Malpasset, Rapport Définitif, Aout 1960.

7-Jaeger, Charles. "The Malpasset Report". Water Power, Feb.1963, p.55.

8-Kersch, George A. "Vaiont Reservoir Disaster: geologic causes of tremendous landslide accompanied by destructive flood wave" Civil Engineering, March 1964, p.32.

9-Department of Water Resources, California, "Investigation of failure, Baldwin Hills Reservoir" April - 1964.

10-Aitchison, G.D., Ingles, O.G., Wood, C.C. "Post-Construction deflocculation as a contributory factor in the failure of earth dams". Forth Australia - New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng'g., 1963, p.275.

11-Rocha, M. - "Mechanical behaviour of rock foundations in concrete dams" 8th, Int.Congress on Large Dams Edinburgh, 1964; Memoria nº 244, LNEC, Lisboa,1965

12-Comunicação pessoal, Laboratório da Escola Politécnica de Zurich, 1956.

13-Bishop, A.W., Webb, D.L., Lewin, P.I. "Undisturbed samples of London clay from the Ashford common shaft; strength-effective stress relation ships". Geotechnique, Vol.XV, nr.1, March 1965, p.1.

14-Terzaghi, K., Lacroix, Y., "Mission Dam: an earth - and rockfill dam on a highly compressible foundation". Geotechnique Vol.XIV, Nr.1, March 1964,p. 14.

15-"Ponencia base del Comité Nacional Español de grandes presas sobre la instruccion para proyecto , construccion y explotacion de grandes presas".Revista de Obras Publicas, Madrid, abril 1964, p. 611.

16-Gomez Laa, G. "El hombre en la presa". Revista de Obras Publicas, Madrid, abril 1964, p.475.