

Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Curso CEEB, Abril de 1988.

EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE CONSTRUÇÃO  
DE BARRAGENS, E PERSPECTIVAS FUTURAS

VICTOR F.B. DE MELLO

Podemos afirmar que fatores diversos nos levaram a um grande avanço nos aprimoramentos de projeto, de construção, e de auscultação de barragens de acumulação d'água, antes de se terem implantado no País os notáveis ritmos de mineração, e de beneficiamentos das formas brutas mineradas, que passaram a exigir o recurso a importantes barragens e reservatórios de contenção de rejeitos de lamas e líquidos diversos.

Assim, não surpreende o ter ocorrido uma transposição direta dos conceitos das barragens de terra-enrocamento de acumulação de água, para as barragens de rejeitos de mineração e industriais. Os dois casos apresentam, porém, diferenças muito importantes. Muitas delas são óbvias e de reconhecimento corrente (mesmo que por vezes não atendidas por falta de conhecimentos), bastando listá-las. Outras, com as quais nos preocupamos na presente exposição, dizem respeito a problemas menos evidentes embora igualmente sérios e aceitavelmente reconhecidos na teoria e prática da materialização de barramentos adequados.

1. Evolução histórica e ajustes locais, dos projetos e da construção de barragens.

Não cabe tornar a repetir alguns aspectos já salientados enfaticamente desde aproximadamente 1970 quando realmente passamos, no País a encarar múltiplos tipos de barragens como ditados por hidrologia, geologia e, em conceito fundamental, pelo ARRANJO GERAL: para uma compreensão justa e construtiva, é necessário começar por reconhecer quais as razões compreensíveis, pelas quais determinadas práticas teriam nascido e perdurado, como válidas, até correção ulterior. Na Fig. 1 anexa postulo três origens básicas dos tipos de barragens que, com correções e aprimoramentos, passaram a estabelecer os princípios da constituição de seções de barragens.

Tomo a liberdade de repetir aqui alguns dos Princípios Básicos de Projeto (Design Principles, DP-1 a DP-5) que foram enunciados na minha Rankine Lecture 1977. Insisto liminarmente na necessidade imperativa e humilde de fugir a situações

da ESTATÍSTICA DOS EXTREMOS: insuficiência de dados, incorreções inescapáveis de dados insólitos, variações do próprio universo, etc. são notórios; menos corrente é o reconhecimento de que formulações matemáticas, por mais eruditas, não passam de idealizações, e, quanto mais sofisticadas, digeríveis apenas nas entranhas de grandes computadores, menos nos permitem assimilar, aquilatar, e decidir, pois toda a EXPERIÊNCIA (animal) do ser humano é a "sentida na carne" pelo parâmetro complexo do produto final, e não pelos parâmetros analíticos remotamente associados para sintetizar influências computadas.

Como corolário inexorável, cabe enfatizar que a EXPERIÊNCIA DO COMPORTAMENTO PREVISIVELMENTE ACEITÁVEL só pode ser gerada por estatística de médias, por repetidos comportamentos aproximadamente análogos. Os episódios de ruturas são indispensáveis para indicar quais as fenomenologias físicas geradoras de rutura, da qual, qualquer que seja, as obras tem que ser defendidas (a) por mudança do universo físico (b) por amplo coeficiente de segurança, para preservar o comportamento estatisticamente frequente nos limites desejados ou tolerados ("SATISFACTION INDEX", "ÍNDICE DE SATISFAÇÃO", Rankine Lecture 1977). A Engenharia de observação de "casos de obras" (unitárias) já se tornou inapelavelmente maçante e estéril, pois só se pode extrair orientações quantificadas a partir de casos razoavelmente análogos, repetitivamente observados até se estabelecerem os comportamentos da estatística de médias (e dispersões respectivas).

Na Fig. 2 submeto um resumo conceitual de como os Princípios de Projeto de barragens "granulares" foram sendo ajustados em função da racionalização de casos observados de ruturas; as atenções concentraram-se naturalmente sobre os casos mais catastróficos gerados pela atuação da água represada (atuação liminarmente assimétrica), subdividindo-se tal atuação nas categorias de ruturas de massas deslizantes (estatística de médias, adequadamente interpretável e sanável pela teoria quantificável de redes de percolação) e nas ruturas de erosão tubular regressiva, "piping", sempre associada a alguma condição localizadamente desfavorável (estatística dos extremos, atendida brilhantemente, em primeiro grau de aproximação, pela engenhosidade da incorporação do elemento físico dominante, o filtro-dreno, de alteração radical do universo estatístico).

Para fins de recapitulação que me permito considerar muito importante reproduzo na Fig. 3 a árvore básica do Princípios de Projeto (DP-1 a DP-5) postulados na Rankine Lecture, 1977, e, que tenho tido o prazer de ver progressivamente mais cultuados. Respeitando os imensos esforços que nos últimos 40 anos em hidrologia-meteorologia, e nos últimos 15 em tectonismo-sismicidade, foram e vem sendo religiosamente

dispendidos nos cálculos de enchentes catastróficas para vertedores, a PMF ("Probable Maximum Flood", máxima cheia "provável", que chamei a "once-never flood", a cheia de "uma-vez-nunca"), e nos "cálculos" do MCE ("Maximum Credible Earthquake", máximo terremoto "acreditável"), permito-me inserir um aparte irônico quanto ao fato de que os qualificativos empregados nos nomes denunciam o complexo psicológico do engenheiro dominado por "wishful thinking", pensamento condicionado pelo desejo: curiosamente quanto ao nome Máxima Cheia Provável, sabe-se bem que não há qualquer "probabilidade" ou "recorrência estatística" associada ao episódio prognosticado, nem realmente existe o menor vislumbre de se poder associar "probabilidades estatísticas" ao número calculado; de mesma forma, a despeito de teorizações em função de placas tectônicas, energias liberáveis, etc., reconhecemos que não há a mínima base quer geocientífica quer estatística, de se atribuir alguma "credibilidade" às Magnitudes e Intensidades dos sismos "calculados" como correspondentes ao "máximo sismo acreditável". Sugiro reportarmos-nos às publicações da autoridade ímpar internacional do Prof. Emílio Rosenblueth com relação ao sismo catastrófico sofrido pela cidade do México, Setembro 1985: Rosenblueth mostra que não só o caso ultrapassou de longe a intensidade atribuída ao Maximum Credible Earthquake, mas também que se o Código de Obras da cidade fosse revisto para atender ao novo limiar, cerca de dois-terços da população da cidade seria desalojada por enorme encarecimento das fundações e estruturas.

O ponto fundamental é que as crescentes sofisticções de cálculos tem levado a perda de perspectiva de que quaisquer desses valores empregados na engenharia constituem realmente valores de DECISÃO, e não uns parâmetros fixos para o local. Assim, a enchente PMF não pode ser adotada como um número fixo, independente do comportamento da represa e das comportas do vertedor quanto a ritmo de subida da água por diferença de vazões afluente e efluente, porque velocidade interfere em decisões e ações; e muito depende dos riscos, e custos dos riscos, para jusante! Assim, por exemplo, em pequeníssimas bacias de deposição de lamas não só temos a estatística dos extremos de ocorrência pontual (trombas d'água), como também a impropriedade de adotar laminação por volume de subida do nível represado: e também a variação da área e volumes "úteis" com o tempo, em função de sedimentação etc... (sugerindo uma estimativa de PMF variável sistematicamente ao longo da vida da "represa", inclusive após abandonada); e, finalmente, a eventualidade de uma ruptura, e a muito maior catástrofe para jusante no esvaziamento brusco de uma "onda de lama" (em comparação com água).

Repito: respeitamos todos os cálculos como apoios às quantificações que precederão as DECISÕES da engenharia, mas não as substituem nem remotamente. Não nos iludamos quanto aos níveis de decisões, possivelmente três:-

(a) os casos de âmbito tão extraordinário que escapam à escala huma-

na, os "Acts of God" reconhecidos na engenharia e legislação anglo-saxônicas (citemos como exemplos recentes a erupção do vulcão Mount Saint Helen, E.E.U.U., cuja lava por sorte não se dirigiu na direção da represa Swift, nem a teria atingido por pequena distância faltante; e também, a catástrofe recente da aldeia Colombiana soterrada por um "lahar", episódio vulcânico Andino de avalanche de lavas, lamas e águas de geleiras derretidas pela erupção);

(b) os casos da estatística dos extremos, preferivelmente atendidos por alteração física do universo estatístico da obra vislumbrada;

(c) finalmente, os casos teorizáveis, com graus de confiança e probabilidades razoavelmente calculáveis, e atendidos por vias normais de dimensionamentos de projeto, da obra fisicamente já escolhida.

Na Fig. 4 resumo uns poucos casos de barragens de nosso aprendizado, superiormente tutelado (Terzaghi, Casagrande, e poucos outros, menos frequentes) aproveitando para os desenhos a reprodução direta a partir das múltiplas publicações em que ocorreram. Referem-se basicamente ao período 1955-60. Resumidamente saliento os erros, e as ulteriores correções que foram ditadas pela experiência local, interagindo com a internacional. Tanto nas barragens de Saramenha (Ribeirão da Cachoeira) como nas de Graminha e de Nhangapi ocorreu a prática (consagrada) de permitir o filtro-septo chaminé terminar em cota mais baixa do que o nível represado máximo normal, o que decorria da confiança absoluta em redes de percolação em maciços "homogêneos etc...": aprendemos a reconhecer tal prática como errada, exigindo o filtro-septo total, não só por causa de possível "camada" francamente mais permeável que possa ter sido lançada atravessando a praça mais estreita do topo da barragem, mas também por causa da vulnerabilidade do topo a trincas de tração e de contração etc. que cruzem montante-jusante.

Ainda na mesma Fig. 4 saliento outros erros que vieram sendo corrigidos. (1) Errada a grande importância dada às instabilidades eventuais do talude de montante, tanto por pressão neutra ( $u$ ) construtiva (que vem sendo observada em níveis muito baixos, exceto em casos de caixas de empréstimo próximas da saturação e quando empregada compactação exagerada para o caso, fatos estes amargamente revelados por umas ruturas gritantes), como pela condição teórica postulada (ex. Bishop et al.) para sobrepressões neutras de abaixamento "instantâneo" do nível da represa.

(2) Errado empregar superfícies cilíndricas de possível deslizamento, pois ruturas sempre tendem a iniciar por trincas de tração junto ao topo, sendo sub-verticais até boa profundidade, função da coesão.

(3) Erradíssimo empregar tubulações para a drenagem do fundo da zona de jusante, especialmente em casos de barragens de mais do que vintena de metros de altura (não obstante a prática ter sido gerada por Terzaghi, Barragem e Dique de Vigário, 1948-50). (4) Errado, conceitualmente, empregar "poços de alívio" (drenagem sendo prioritária para segurança da estabilidade de jusante) em posições em que, conforme surjam indicações (seja no primeiro enchimento, seja a longo prazo com possíveis colmatações), não seja fácil complementá-los e/ou reativá-los etc. (5) conceitualmente e segundo indicado por experiência ulterior, não deixa de ser francamente errado empregar o tapete filtro-drenante subhorizontal do fundo do maciço de jusante, em cota elevada (inclusive acima da cota da ensecadeira de jusante, ou do nível máximo de enchente de jusante, tal como foi muito frequente). Ademais do desejo de "forrar" a fundação, merece interesse a postulação de se evitar deposições ferruginosas aeróbicas nos filtros, pelo fato de os manter permanentemente submersos.

(6) As ilusões quanto aos limites de Atterberg como significativos em solos insaturados, lateritizados, ligeiramente nucleados por cimentações de longuíssimo prazo, e/ou residuais e saprolíticos, foram tantas, que merece enfatizar-se que os referidos Limites e Índices nasceram de forma rudimentar para atender a sedimentos saturados jovens, sem "estrutura e sensibilidade" significativas. Ademais, como mostraram W. Gobara et al., 1986 "Os ensaios de caracterização 9 anos de programa interlaborial" (ABMS, VIII Congresso, Porto Alegre, vol. I pp. 21-32) os ensaios não fornecem resultados confiavelmente semelhantes (ver Fig. 6 a) independentemente de laboratório e operador. A experiência desenvolvida continua a dar muita importância ao manuseio pessoal e individual da "plasticidade" do solo, mas a interpretação é altamente subjetiva e nada tem a ver com os números fornecidos pelos ensaios rotineiros.

Conforme mencionei, nos anos '50 houve (principalmente no M. I. T) intensa atividade de investigação de efeitos de aditivos químicos, em proporções diminutas, para a estabilização dos solos. Na época, Aitchison (Australia 1963) relatou casos de efeitos coloidais de sais solúveis de represas (em regiões áridas) em percolação através da barragem, tendo atribuído à "dispersão coloidal" respectiva as ruturas anteriormente consideradas de retro-erosão ("piping"). (ver Mello, ABMS, 1966, etc... ). O assunto foi fortemente reativado, a partir de 1975 aproximadamente, pelas postulações de Sherard referentes às "argilas" ditas "dispersivas". A intervenção de defloculante(s) em ensaios de sedimentação sempre foi reconhecida e frizada: a Fig.5 exhibe a magnitude de tal influência na argila porosa da Avenida Paulista, São Paulo. O assunto passa a ter importância acentuada em represamentos de rejeitos industriais, tanto por riscos à segurança da barragem, como por contaminações ambientais das águas geohidrológicas. Merece frizar-se também a interferência do

histórico de percolações (cf. último gráfico da Fig.6), inclusive porque com o abaixamento do nível represado, podem ocorrer cristalizações impermeabilizantes irreversíveis em zonas previstas como drenantes. Tais temas exigem muito maior atenção, mediante ensaios particularizados, alheios a qualquer "norma", de caso a caso: passa a ser perigoso generalizar.

Apenas para confirmar a nova atualidade do tema por motivos crescentemente sérios de controle ambiental transcrevo um dos vários títulos de artigos publicados recentissimamente: "condutividade hidráulica de argilas compactadas para soluções químicas orgânicas diluídas", J.J. Bowders e D.E. Daniels, ASCE, GT Jour., Dez. 1987 p.p. 1432-1448, em que investigaram a partir de que concentrações, diminutas, as soluções químicas orgânicas alteram significativamente a condutividade hidráulica, e em que empregaram, com algum sucesso, os ensaios Índice de classificação dos solos segundo normas ASTM, porém substituindo, meticulosamente em cada caso, a água (destilada) intersticial pela solução específica em investigação.

2. Otimizações a que chegamos na teoria e na prática em nossas seções-tipo, e nas técnicas de construção e de fiscalização respectiva.

Já mencionei, e enfatizo de novo, o fato de que sempre se absorveu, e se absorve, muito conhecimento do estrangeiro, porém, toda a nossa história evolutiva das barragens nos ensina que: (a) nunca se dispensa a necessidade de ajustar, e mesmo corrigir, apreciavelmente, o que se "importa" de outros países, independentemente de suas consagrações como muito mais adiantados; (b) mais se aprende procurando criticar o que se vê divulgado pelos ensinamentos externos, mas isto não são para separar o errado do certo, e do certo para eles enquanto nocivo para nós, mas principalmente sempre perscrutando o porque da prática ter evoluído com intenções corretas e promissoras, desde que interpretadas em seu contexto específico, geotécnico e da engenharia civil do País, da região, e do período em questão; (c) desnecessário frizar, a repetição de uma mesma seção em casos sucessivos, independentemente de condições distintas e do aprendizado extraído progressivamente de cada obra, constitui a definição da antítese da engenharia.

Nas Fig. 7 a 10 resumimos algumas das principais otimizações em questão, e que, segundo frizamos, em certos setores divergem radicalmente tanto de práticas que vieram sendo evoluídas em países adiantados, como também de nossas próprias práticas anteriormente comprovadas como satisfatórias. Nada de xenofobias nem de "tropicalismos", mas sim, o respeitoso cumprimento do dever profissional de otimizar a engenharia às situações locais. Visto que todos os pontos salientes resumidos nestas Figuras são extraídas de uma sucessão de artigos de minha autoria, permito-me resumir os comentários sobre as feições marcantes da experiência postulada.

Na Fig. 7 estão postuladas três seções-tipo que incorporam princípios básicos disponíveis para otimizações de caso a caso. Na seção tipo "homogênea" a empregar sobre ombreiras terrosas frizamos o abandono do filtro-chaminé vertical: uma razão já muito comentada, era a do "efeito de silo" de redistribuição de tensões na parte superior por incompatibilidades de deformações verticais, podendo levar às trincas de tração, fraturamentos hidráulicos; outra razão que se evidenciou mais recentemente é que perante a tendência de deslizamentos de taludes terem um trecho superior subvertical, o filtro arenoso passa a ser um convite a um longo trecho vertical de baixíssima resistência ao cisalhamento, pois esta depende precipuamente da pressão lateral (horizontal). O filtro-septo ligeiramente inclinado para montante, para convidar as pressões de percolação a serem de compressões, e o tapete-impermeabilizante interno das duas seções superiores da Fig. 7 são extensamente justificados na Fig. 8 (composta a partir de pontos fundamentais da Rankine Lecture 1977): note-se

que um tanto do efeito benéfico da redução de permeabilidade sob o tapete-interno (e assim como no mesmo) é obtido no caso de barragens sobre ombreiras pela compressão um tanto maior no centro, "na tigela de recalques".

Na Fig. 8, que resume alguns enunciados práticos importantes discutidos na Rankine Lecture, 1977, resumimos os pontos: (a) a importância da pressão de precompressão devida à compactação, pressão essa que ocorre acentuadamente tanto nos solos argilosos compactados como nos enrocamentos angulares são compactados, e que reflete na compressibilidade-recalques, na envoltória de resistência, e na não-homogeneidade da permeabilidade em barragens "homogêneas" compactadas quando mais altas; (b) as envoltórias de resistência como curvas (ou poligonais, por simplificações de decisão), devidamente diferenciados os trechos "preadensados" e "virgens"; (c) a significativa alteração da rede de percolação convencional, e a validêz do emprego do tapete-impermeável interno; (d) o fato de que o tratamento de rochas fraturadas por injeções de cimento constitui um tratamento liminar, de eliminação da estatística dos extremos (fraturas maiores, francamente abertas ao fluxo), e de "homogeneização" de uma zona, conceito diametricamente oposto ao conceito convencional errado da criação de uma "cortina impermeável como uma delgada descontinuidade no maciço permeável".

Na Fig. 9 resumimos pontos muito importantes quanto à compactação de campo, sua modelação em laboratório, e questões de especificações de controle da umidade de compactação na obra. As principais diferenças detectadas resultam em comparação com a avançada prática Inglesa, e suas evoluções (ou involuções?) recentes (a rutura da barragem de Carsington, 1984, incorporaria fatores já detectados entre nós?). Interpretamos o assunto como ligado aos índices físicos (da argila do empréstimo) in situ (principalmente densidade e grau de saturação) salientando que a principal experiência Inglesa não representa compactação (solo insaturado, menos denso) e sim, amolgamento de argilas fortemente preadensadas, com densidades in situ maiores do que a da compactação, e saturadas (o que exclue compactabilidade). Equipamentos menos possantes (anos '40 a '60) só escavavam os nossos solos "porosos", nunca suscitando problema: equipamentos possantes de escavação moderna descem facilmente a profundidades em que o "problema Inglês" passa a interferir em nossas obras. Tal demonstração está reproduzida na Fig. 9(b): um solo denso, saturado, chegaria a indicar necessidade de adicionar água para chegar à "umidade ótima de compactação", o que só agravaria problemas de compactação deletéria por amolgamentos, super-compactação, "superfícies espelho" subhorizontais, sobrepressões neutras elevadas de compactação e de período construtivo. Porém, na Fig. 9(a) topo resumem-se as indicações publicadas de que não existe a mínima analogia (presumida para fins de ensaios pré-

projeto) entre compactação de campo, com fortes cisalhamentos, e a de laboratório em molde metálico rígido. Assinala-se o emprego Inglês do limite de traficabilidade como controle de compactação (evolução proposta em Estradas, 1978 aproximadamente), lembrando porém os graves riscos de (a) só servir para barragens baixas a médias (b) depender muito do peso do equipamento trafegando (c) gerar superfícies espelho (slickensides) horizontais (gravíssima anisotropia para resistência, fraturamento hidráulico, etc.), sem indicação do problema salvo mediante poços de inspeção.

Ainda com relação a problemas de controle de compactação, em que nos achamos no limiar desapercibido entre uma experiência favorabilíssima de solos poro-sos insaturados, e novos horizontes densos e saturados agora escaváveis, merece ponderar-se sobre propostas recentes de empregar a Resistência à Penetração (de penetrometro portátil) como índice aprimorado para o controle da compactação! Resumem-se alguns pontos na Fig. 10. Liminarmente assinalamos a ironia de se estar conceitualmente retornando aos anos '30 e '40 e à "agulha de Proctor" como controle de umidade de compactação (U.S.B.R.): já para a época a recomendação do "Earth Manual" havia suscitado a preocupação quanto a graves dispersões, tais como reproduzidas na Fig. 10 (topo) meramente por extração dos dados de uma só barragem "Design and Construction ... of Heart Butte Dam" (1952). Na Fig. 9 inferior submetemos à análise crítica proposta recentemente renovada (Charles, 1979, e colegas do British Research Establishment, merecidamente admirado em inúmeros trabalhos). Infelizmente o recurso a correlações de resistências "rápidas" com os limites de Atterberg tornam inevitável a dispersão, que em assunto de umidade de compactação passa a ser muito sério: para equipamentos pesados, e, principalmente, para barragens mais altas, pequenas diferenças da umidade de compactação em comparação com a desejada, podem muito rapidamente transformar a situação de uma obra, de confortável a perigosa e mesmo rompida inapelavelmente.

Finalmente, no tocante a contribuições autoctones a um estado de otimização internacionalmente incontestada, resumo na Fig. 11 dois aspectos de grande relevância, embora transcritos apenas para servirem de lembrete de publicações em grande número e ampla exposição. Um tópico de grande relevância foi e continua sendo o de critérios de filtros: aceitando algum critério de filtro para granulometria contínua, enunciou-se um procedimento de análise-índice de quando a curva granulométrica configura uma descontinuidade inaceitável e perigosa. Trabalhos recentes do hemisfério norte passaram a apontar o material granular de gama extensa (ex. o "till" glacial) como muito perigoso ao invés de ser o material "ideal" (cf. mentores mais categorizados de há 30 anos, Terzaghi etc...), tanto por poderem existir em granulometria descontínua, como por tenderem a resultar em granulometria descontínua na construção,

por segregações inevitáveis. Os graves apuros enfrentados pela barragem de Tarbela deixaram marcas profundas, vale portanto o lembrete da Fig. 11 (topo).

Na parte inferior da Fig. 11 enfatizo o conceito de que, curiosamente, dois assuntos ligados como irmãos Siameses tem tido um histórico absolutamente separado e diferente nos últimos 40 anos. Por um lado, Taylor 1945-49 (seguido de Lambe e Ladd etc, SHANSEP) frizam a importância do histórico de tensões (darei "stress-strain-time trajectory") em ensaios para investigação de resistência. Faltei frizar que a investigação da resistência é apenas um meio, e não um fim: o fim é a análise de estabilidade (de taludes, por exemplo). Ora, em minhas postulações (da última década) passei a frizar que não tem sentido fazerem-se análises de estabilidade de taludes de barragens, para condições críticas diversas, como se cada condição nascesse "do zero": o que se deve analisar é a sequência de variações de condição instabilizante. Por conceito óbvio de ângulos de dispersão, colimamos o alvo muito melhor quanto mais próximo estivermos dele: ademais, por princípios de ajustes sucessivos Bayesianos, melhoramos muitíssimo o grau de conhecimento. Postulado, portanto, que é conceitualmente errado persistir na prática (dos anos '30 a '50) de analisar as estabilidades dos taludes sob diversas "solicitações críticas" independentes: o que é obrigatório fazer é analisar a trajetória de instabilizações sucessivas no histórico de cada um dos dois taludes. Ipso facto, a fortiori, um projeto é muito melhor quando ele passa por condições "menos estáveis" em período construtivo (menos dano eventual) do que em períodos operacionais subsequentes; o projetista emprega todos os meios possíveis para que a estabilidade só melhore a cada passo, e com o decorrer do tempo.

Não podendo me delongar, porém respeitando o princípio enfatizado de que não existe a culminação do saber a um ponto estático, sendo o progresso e a otimização uma preocupação contínua, limito-me a resumir na Prancha alguns itens salientes que presentemente suscitam atenção como PROBLEMAS EM FOCO para as barragens de acumulação de água, presumidas como pertencentes à intimidade da geotecnia.

3. Dimensões e responsabilidades comparativas em jogo. Barragens para água e para "rejeitos".

Face a responsabilidades perante o talvegue a jusante, e às rupturas físicas típicas já sofridas, podemos resumir alguns dados comparativos de maior relevância, comparando os dois casos (Ver Prancha A).

Evidentemente a quase totalidade dos problemas associados a obras estão fortemente associados à altura: afora os problemas de comportamentos de tensões e de deformações do maciço, na eventualidade de qualquer problema para jusante, a energia potencial liberável e a altura da onda devastadora, etc., tornam a altura máxima da barragem a dimensão mais expressiva de sua importância. Igualmente sérios são os volumes acumulados, que seriam liberados catastróficamente: a grande margem de diferença contra as barragens para água está sendo reduzida ousadamente; ademais, cabe enfatizar que, até distâncias menores ao longo do talvegue, a maior densidade da lama, mais viscosa, pode resultar muito mais catastrófica na eventualidade da ruptura para jusante.

A área da bacia hidrológica e da superfície d'água marcadamente insignificantes nos casos de barragens de rejeitos tem servido para minorar preocupações, aceitando-se cálculos hidrológicos de vertedouros bem pequenos, praticamente desprezíveis. Se por um lado as pequenas magnitudes das vazões e obras hidráulicas parecem indiscutíveis, por outro lado cabe enfatizar que é justamente em bacias muito pequenas (geralmente com taludes bem íngremes) que soem ocorrer os fenômenos da maior dispersão estatística (ex. "trombas d'água") com perigosa rapidez de ascensão do nível represado em curtíssimo prazo: e, são pouquíssimos os dados pluviométricos de curtíssimos tempos de concentração, após a saturação do terreno, tornando muito problemática qualquer previsão de vazões críticas de projeto. Embora não seja esta a diretriz principal da presente exposição, cabe enfatizar que os problemas de falta de capacidade vertente de enchentes catastróficas continua a ser um dos riscos mais graves de barragens de terra-enrocamento, e, portanto, a fortiori o será nas de contenção de rejeitos. Não é lícito "calcular" um só valor de PMP e/ou PMF ("vazão máxima uma-vez-nunca") visto que qualquer de tais cálculos constitui um esforço de atribuir roupagem quantificada a uma estimativa judiciosa de uma vazão tão alta quanto imaginável, sem onerar demasiado os órgãos hidráulicos: reitero que o PMF é um "valor de DECISÃO", apoiado em cálculos diversos, e merece ser adotado em níveis mais prudentes quando é:-

- (a) maior a dispersão, menor a extensão do período, da informação, e essencialmente nula a informação de pequenos tempos de concentração ;

- (b) mais rápida a velocidade de subida do N.A. represado com a laminação da enchente afluyente;
- (c) menor a borda livre;
- (d) maiores os riscos de danos eventuais, etc...

Ainda na questão meteorológica-hidrológica, que por falta de tempo deixo de lado, repito a enorme importância do balanço hídrico, inclusive de seu acompanhamento e revisão Bayesiano contínuo no decorrer da operação da obra de acumulação de rejeitos. São enormes os graus de desconhecimento tanto dos fatores superficiais e atmosféricos, como dos fatores geohidrológicos (de subsuperfície): mas perante os problemas modernos de controle ambiental, se investigarmos os manuais de qualidade de água de qualquer lugar do mundo civilizado (i.é. mundo das indústrias químicas predatórias etc..) comprovamos que todas as componentes dissolvidas são expressas em partes por milhão. E, e será, um problema muito sério ajustar projetos de barragens e de acumulações químicas para atender a requisitos de médio e longo prazo: direi mesmo que não se inclui na boa engenharia e economia, a pretensão (ou melhor, presunção) de resolver desde logo todos os problemas do amanhã e do futuro; muito pelo contrário, como, via de regra, das soluções de uma geração nascem os flagelos enfrentados pela próxima, a boa engenharia (técnica-econômica) respeita o princípio de atender aos problemas reconhecidos e prioritários do futuro próximo, deixando os ulteriores a se evidenciarem e serem resolvidos nas épocas oportunas! O importante é não fechar as portas à inclusão de soluções ulteriores, algumas previsíveis, a maioria insuspeitáveis por motivo dos progressos fenomenais das ciências, tecnologias, civilizações.

Poderá parecer que na questão de deposição de rejeitos em vales "fechados" por elemento estruturalmente resistente como barramento, os problemas se limitam a casos de acumulações líquidas. Apenas em aparte sinto-me obrigado a frisar que não é assim: os casos de deposições de imensas pilhas de rejeitos "secos" em vales também apresentam, em maior ou menor grau problemas geotécnicos, geohidrológicos, químico-mineralógicos, etc.. Deixo de lado o problema de eventuais "liquefações" por movimentos cisalhantes bruscos e/ou cíclicos-sísmicos, problema sobejamente reconhecido como atribuível aos depósitos de finos de rejeitos em estado solto. Um aspecto frequentemente importante é o de lixiviações por infiltrações de chuva, dado que a relação de superfície específica (para volume), e conseqüente solubilidade, aumenta muitíssimo com a finura. Um aspecto quase nunca lembrado é o das conseqüências da acentuada redução de permeabilidade com o aumento da pressão (e conseqüente compressão dos poros), fator que ocorre tanto no terreno natural subjacente ao depósito, como ao longo da profundidade do depósito: assim, num vale com significativo peso de enchimento, a parte inferior (drenante) do fluxo geohidrológico será comparativa-

mente reduzida em permeabilidade, e, para infiltrações pluviais constantes nos taludes superiores expostos, a consequência inexorável será a da subida significativa da piezometria geohidrológica; já tive conhecimento de escorregamentos de taludes em consequência de tal subida da rede geohidrológica natural, sem ter havido qualquer incremento de líquidos!

Em resumo, nunca subestimemos o que pode advir, de uma barragem e/ou de um significativo depósito: a lista de checagem ("check-list") deve ser ampla, considerando "tudo" (i.é. o tanto quanto se possa cogitar) como admissível até prova em contrário! O importante é não começar os raciocínios às avessas, admitindo que quase nada possa ocorrer, até ser surpreendido com a ocorrência. Repito a importância de discutir, em crítica construtiva, as práticas a que evoluíram "outros", para melhor entender: e, como o problema de injeções (até mesmo de soluções químicas) para a impermeabilização "maximizada" em rochas passa a ser muito importante em alguns depósitos químicos, nucleares etc., altamente poluidores, menciono o fato de ter estranhado declarações de um Sueco de que na Suécia, em rochas boas a grande profundidade, era prática injetar com pressões altíssimas, para expelir "toda" a água de fissuras e poros. Considerando a prática "Americana" de abominar pressões de injeção superiores a cerca do peso do material rochoso sobrejacente, indaguei quanto à estranha diferença. A resposta foi plenamente satisfatória. Na Suécia um dos fatores de deterioração é a variação volumétrica no congelamento d'água, e os ciclos gelo-degelo: assim, as fundações rochosas etc... comportam-se muito melhor a longo prazo se forem "exageradamente" injetadas.

Cabe frisar aqui uma diferença muito importante entre requisitos de projeto, em barragens correntes para água (hidrelétricas etc.), e as barragens para rejeitos e reciclagens de mineração e de água industrial. O princípio mais fundamental exigido para a SEGURANÇA (prioritária) de barragens d'água, é a drenagem, inclusive a drenagem da fundação: perdas d'água são comparativamente irrelevantes. Em contrapartida, a drenagem incrementa as perdas por percolações. Assim, nos represamentos de rejeitos químicos etc.. é obrigatório abrir mão da franca drenagem favorecida, ou melhor, só empregá-la após contar com a injeção como efetivamente impermeabilizante: necessidade ditada por controle de poluição de águas geohidrológicas, e, em parte, por comparativa necessidade de economia de vazões para os balanços hídricos. Tutelavam-nos as autoridades internacionais, de jamais confiar em injeções como efetivas (o que era uma verdade transitória e relativa): como de costume, erra a generalização dogmática, pois qualquer elemento executado é pouco efetivo até que se determine e resolva que terá que ser obrigatória sua efetivação (a processos e custos correspondentemente incrementados).

VICTOR F. B. DE MELLO

4. Discussão de algumas diferenças acentuadas em problemas de barragens e acumulações de rejeitos, em comparação com as práticas otimizadas de barragens para água pura.

Podemos presentemente assinalar que são tantas as diferenças e erraticidades, de caso a caso, e dentro do mesmo caso, que não cabe esperar para breve uma sintetização "teórica" de recomendações para projeto. Recorre-se quase sem exceção a citações de exemplos e dados, e a discussões sobre eles. Permito-me, pois, por obrigado, a proceder de mesma forma, empregando figuras "compostas" pela extração direta, xerocada, das fontes de referência mais correntes: passo a discutir sobre as Figuras respectivas.

Na Fig. 12 resumem-se alguns problemas e dados quanto a permeabilidades, acentuando-se as importâncias de pequenas diferenças quando estão em jogo pequeníssimas permeabilidades. O gráfico da Fig. 12(a) mostra para um caso importante (fluxo radon) não só as variações apreciáveis de comportamento dos rejeitos finos em função de profundidade, mas também as diferenças significativas resultantes da condição do rejeito (seco, úmido, ou encharcado-lama): não bastando as diferenças supra, no gráfico da Fig. 12(b) focaliza-se o fato de que são significativas também as diferenças de umidades e fluxos (históricos irreversíveis) em função da sequência de acréscimos ou de evaporações da umidade. Nos gráficos 12(c) e 12(e) bem como na tabela 12(d) resumimos algumas indicações sobre as permeabilidades diminutas em jogo, e suas comparações, inclusive com membranas tidas, em conceito leigo, como "absolutamente impermeáveis": elementos adequadamente impermeabilizantes apresentam coeficientes de permeabilidade na gama de  $10^{-7}$  a  $10^{-11}$  m/s, não se registrando (em laboratório) diferenças perceptíveis entre argila compactada, bentonitas de diafragmas, e geomembranas; frize-se porém, que em maciços argilosos compactados a permeabilidade média é muito influenciada por descontinuidades etc...

Na Fig. 13 resumem-se os ditames clássicos de barragens de rejeitos. No topo esquerdo estão configurados de forma conceitual os 3 tipos de alteamento, por montante (intuitiva e economicamente preferido, porém mais arriscado), por jusante, e centrado no eixo. Por analogia com problemas históricos graves, com condutos atravessando barragens "convencionais", no topo direito resumo informação de um caso de empuxos sobre conduto (generalizadamente usados em barragens de rejeitos): observemos a significativa variação de pressões, e correspondente facilidade de gerar fraturamento hidráulico ao longo do contacto externo solo-concreto. Finalmente, no centro e fundo da Fig. 13, incluem-se indicações dos dois outros problemas principais, que são (a) alteamento do vertedor e (b) tubulações montante-jusante que

permanecem perigosamente sob o maciço gradativamente alteado.

Na Fig. 14 reproduzo alguns casos publicados, importantes, de barragens de rejeito do tipo com alteamento por jusante, para frizar pontos que seriam liminarmente questionados e/ou condenados em barragens convencionais para água. Inicialmente cabe salientar que nas barragens convencionais para água, alguns dissabores (e mesmo ruturas) levaram a grave preocupação por descontinuidades tais como são inexoráveis em barragens de, e para, rejeitos (por motivos de economia, muito mais acirrada nos campos da mineração); por um lado deveremos reconhecer que o tabu nas barragens de terra foi levado a exagero injustificável, mas por outro lado não podemos deixar de reconhecer que as construções por etapas sucessivas frequentemente convidam perigos, e convidarão algumas catástrofes.

Na seção superior Fig. 14(a) assinalo o grave erro de terminar o filtro-septo inclinado em cota bem inferior à do nível represado, particularmente considerando a inevitável anisotropia com percolações preferenciais paralelas às "camadas" acrescentadas: não haveria dificuldade em virar o filtro-septo na parte superior mais para a vertical, evitando tal convite a problemas.

Em todas as seções é obrigatório enfatizar o quanto foi, e é, comprovadamente inaceitável empregar tubulações dentro dos maciços, prática que é essencialmente rotineira nas barragens de rejeitos. A prática é facilmente compreensível, tanto pela inexistência de grandes vazões hidrológicas, como pelo uso corrente de tubos para transportes de fluídos e sólidos em suspensões; porém, repito que os conhecimentos das catástrofes decorrentes de quebras, deformações, percolações preferenciais, ruturas hidráulicas de retro-erosão interna, etc., de tubulações montante-jusante em barragens para água, obrigam a uma revisão visceral de práticas correntes nas barragens de rejeitos.

Na Fig. 14(b) ocorrem três fatores criticáveis: primeiro a dependência no tapete impermeável sobre o talude de montante, reconhecendo que podem ser grandes as deformações diferenciais da barragem construída por etapas; segundo, a inexistência de qualquer filtro-dreno "septo"; terceiro, o estranho pormenor dos enrocamentos de pé, tanto mal situados como aparentemente não dotados de filtros, e, finalmente, caso realmente atuassem para drenagem, permitindo ou convidando uma drenagem demasiado a jusante, altamente instabilizante. Na Fig. 14(c) e o pormenor respectivo, salienta-se de novo a perplexidade quanto aos drenos e tubulações drenantes. Finalmente na Fig. 14(d) inferior, não obstante a falta de indicações quanto às etapas de alteamentos em comparação com as posições dos tapetes drenantes, só cabe estranhar o emprego destes tapetes paralelamente ao talude de jusante, e com "boca" de

montante tão próxima da face de montante. Em nenhum dos pormenores supra existirá quem possa concordar com as soluções em função da experiência muito mais delongada da geotecnia aplicada a barragens.

Na Fig. 15 está configurado um caso típico de alteamento centrado, incluindo ciclonamento do material prioritariamente de barramento. Na Fig. 15(a) do topo, assinalo a indicação do interesse de um filtro-dreno-septo: exigência a favor da segurança, conforme já discutida, mas que simultaneamente permitiria empregar taludes de jusante bem menos brandos do que o 1:4. Confiar em tapete-filtrante de fundo reflete a confiança na homogeneidade do material e sua rede de percolação, independente de compressões sob peso próprio, anisotropia inexorável de deposição, etc.: não é aceitável. Por sinal, nos dois gráficos inferiores Fig. 15(c)(d) estão reproduzidos dados de como é francamente variável a concentração de sólidos produzida pelo processo de bombeamento-hidrociclonagem em questão. No caso de grandes dispersões, os projetos tem que se prevenir com maior segurança. Ressaltamos que a compactação, atualmente universal em barragens terrosas para água, constitui liminarmente um processo de homogeneização de camadas lançadas, todas levadas à densidade correspondente ao mesmo esforço compactador: como tal, a compactação permitiu a confiança em cálculos de projeto.

Na Fig. 16 resumimos as condições de um caso típico, importante, de alteamento por montante. Ademais de se repetirem algumas das críticas anteriores, são inexoráveis certos problemas, tal como (a) o fato de grande heterogeneidade com frequente interdigitação de lamas e areias ciclonadas (b) o fato de que o círculo crítico de escorregamento para jusante (muito perigoso) começa com amplo fator de segurança pela drenagem se situar proporcionalmente sob boa parte do maciço de jusante, mas progressivamente maior e maior proporção do maciço de jusante passa a funcionar com rede de percolação. Merece franca preocupação a freática excessivamente alta no maciço de jusante (cabendo lembrar inclusive a anisotropia paralela às sucessivas deposições): o que denuncia a franca incompreensão de princípios básicos de percolação nos solos é o elemento-septo colocado junto ao topo, projetado e executado como impermeabilizante ("clay core") quando deveria ser filtro-drenante. O caso em questão merece discussão mais pormenorizada, motivo pelo qual particularizo atenção sobre os dados da Fig. 17. Observe-se inicialmente no topo da figura as duas hipotéticas superfícies de ruptura, totalmente "a seco" na primeira condição (final de fase 3) enquanto grandemente sujeita às pressões neutras da curva freática admitida (com sua ampla variabilidade): um alteamento essencialmente em talude externo constante não pode deixar de cair fortemente em seu coeficiente de segurança já por este motivo. Motivos adicionais de preocupação agravada com o alteamento são

(a) grande proporção da superfície hipotética de deslizamento que passa a seccionar os depósitos moles e fofos dos rejeitos; (b) a significativa interdigitação de lamias e areias; (c) as baixas resistências ao cisalhamento rápido, e as grandes dispersões respectivas, tais como configuradas nos gráficos de  $R_p$  (resistência à penetração estática de cone) e de "vane shear strength" (resistência ao cisalhamento in situ por ensaio de palheta). Cabe ainda assinalar que embora pareça que a "Design Line" (linha de resistência com profundidade adotada para cálculos de projeto) esteja predominantemente para o lado da segurança, em questão de ruptura por deslizamento basta uma película de centímetros a milímetros, contínua, para que ela condicione toda a superfície crítica e ruptura potencial: as condições de interdigitação de lamias tem que ser apreciadas para bem avaliar se constituiriam películas contínuas, ou dispersões realmente erráticas.

5. Resumo das condições do estado-da-arte em nossas barragens para água e para rejeitos.

Tantos são os conceitos que pretendi relembrar na presente conferência, que para maior conveniência do leitor julguei importante sintetizá-los em quadros de PALAVRAS-CHAVE, (Pranchas A a F).

Sintetizando, permito-me dizer que nos casos de barragens para água nossa experiência tem sido tão franca e exageradamente favorável, que o futuro convida a buscar indispensáveis otimizações de economia. Em contraposição, no que diz respeito à transposição para barragens de, e para, rejeitos, muito justificadas são as preocupações de que, com o tempo e os alteamentos e a multiplicação de casos diversificados, o convite a dissabores e rupturas está aberto, de entrada franca! Estamos apenas no início, o que muito nos favorece; façamos prontamente as reapreciações e revisões que o assunto, e a gravidade da preocupação, exigem.