

# Barragens de terra pouco convencionais e obras de terra provisórias ●

## Aterros hidráulicos ● Aterros depositados em água ● Barragens de rejeitos ● Barragens submersíveis ● Construção por partes ● Proteção de taludes com materiais e processos pouco usuais ● Barragens de solo-cimento ● Tipos especiais de ensecadeiras

Relator: Victor F. B. de Mello

O próprio fato de que o tema se resume de uma forma tão extensa, serve para indicar que o assunto continua a ser encarado dentro de um contexto de "criatividade artística" episódica. Teorização é a única arma que permite a sintetização desejada, tanto para destilação da experiência a cada momento, como para extrapolações para projetos novos, como ainda, para facultar a inexorável revisão da própria teorização a cada colheita de experiência incremental específica; para a comparação entre casos diferentes precisamos de uma teoria que sirva de elo.

Insisto que embora a engenharia progrida em função de engenhosidade, criatividade, e a inexorável aceitação da obrigação de inovar e de testar as fronteiras da impunidade com algum "primeiro caso" (preferivelmente modesto), de fato só podemos trabalhar quantificadamente, e progredir, em termos de raciocínio, i. é. teoria e análise-síntese aplicada a modelos físicos repetidos.

O que é convencional ou não? Quando? Onde? Com que rapidez estaremos dispostos a cair na esclerosada falta de autocrítica passando à posição "quadrada" de considerar convencional o que poucos anos atrás era um

primeiro caso inovativo? A que ponto nos sujeitamos à crítica justa de nos prendermos a uma "moda" recente, por não quisermos ver as outras em seu processo histórico, nem em sua multiplicidade contemporânea em distribuição geográfica, geológica, hidrológica? Aceitando que engenharia é otimização, obviamente não pode ha-



Victor F. B. de Mello

ver barragens convencionais, mas talvez apenas teorização convencional de projeto e análise de barragens.

Ressalto apenas que em qualquer análise de *case histories* devemos ter muito mais cuidado na aceitação de casos que aparentemente discrepar de uma conceituação teórica, do que na incorporação de um dado incremental na estatística Bayesiana de revisão de uma *prior probability* para uma *posterior probability* (cf. Rankine Lecture 1977, e ICASP 3, Sydney 1979, State-of-the-Art). Reconheçamos que muitíssimos casos que têm incorporados em si algum critério e pormenor indesejável, podem perfeitamente "sobreviver" pela graça de um coeficiente de segurança e/ou pela graça divina de uma probabilidade estatística favorecida; ademais, mesmo em casos de insucessos, grande é a pressão para que a análise respectiva não seja objetiva, seja publicada como controvertida, ou mesmo seja mantida em sigilo. Ademais, na análise de obras existentes a comparar com obras a projetar, devemos distinguir entre o que tenho pretendido chamar de Coeficiente de Garantia CG, e o notavelmente diferente Coeficiente de Segurança CS de análises clássicas (Cf. Discussões ISRM, Montreaux

1979, e ECSMFE; Brighton 1979, etc. . .). Finalmente, passou a não ser considerado insucesso da engenharia a realização de uma obra exageradamente segura e/ou onerosa: tal degeneração de conceituação afeta seriamente as regiões subdesenvolvidas, em suas tentativas de desenvolvimento.

Quanto aos conceitos de risco afetando dimensionamento submeto a seguinte subdivisão dos temas:

- Provisórias { "Obras de terra provisórias" (ensecadeiras?)  
Tipos especiais de ensecadeiras
- Obras { Provisórias com comportamento de longo prazo (Barragens de rejeitos)
- "Permanentes" { Barragens de terra pouco convencionais  
Aterros depositados em água  
Aterros hidráulicos  
Barragens submersíveis  
Proteção de taludes com materiais e processos pouco usuais  
Barragens de solo-cimento, etc.

Julgo que podemos excluir liminarmente o tema "Construção por partes", pois caberia reconhecer que de alguma forma toda barragem é construída por partes e/ou tem facetas de construção por partes, sem menosprezar os cuidados requeridos, o que postulo é que apoiar uma parte da barragem sobre uma "ombreira sintética" de outra parte anteriormente construída, em nada difere, conceitualmente (salvo o melhor conhecimento, a favor da ombreira ou fundação sintética), do problema de construção sobre uma ombreira ou fundação (com suas deformações etc.).

Submeto que nas obras provisórias o que está em jogo é a aceitação de um risco bem maior do que para obra permanente (que não deixa de sofrer variações com o tempo, deterioração etc., requerendo manutenção). Por que as ensecadeiras passam a ser bem mais robustas do que algumas barragens permanentes construídas por técnicas análogas?

Situo as barragens de rejeitos em condição intermediária. Em ordem de idéias os interesses de uma mineração são estritamente temporários, a concorrência é apertada, portanto o interesse imediato e de minimizar o coeficiente de segurança CS no tocante aos rejeitos: todavia, a barragem de rejeitos permanece e poderá afetar (gravemente) os riscos para jusante, a médio e

longo prazo. Cabe, portanto, pesquisar e otimizar o CG a despeito do projeto inicial com CS mínimo.

Finalmente, nas obras permanentes temos os clássicos problemas de projeto-dimensionamento exigindo valores de CS maiores porém, reitero (cf. Rankine Lecture) que a boa conceituação de projeto incorpora:

- o princípio do pré-teste (garantindo  $CG \geq CS$ ), que permite ainda trabalhar com CS construtivo baixo;
- a preservação da porta aberta para trabalhos complementares fáceis, caso algum comportamento se revele menos favorável do que desejado, e, inclusive, programação antecipada de tais trabalhos, para que possam ser rapidamente deslanchados.

Para explicar resumidamente a diferença de CG e CS, recorro ao modelo mental de carga de trabalho de uma estaca.

$$CS = \frac{Q_{ruptura\ estimada}}{Q_{solicitação\ estimada}} \geq 1.5 \text{ (por norma)} = \frac{60t}{40t} \text{ digamos,}$$

Ora, consideremos o caso de uma estaca cravada por reação (estaca Mega): a estaca é estabilizada sob uma carga de 60 t e aliviada para encunhar sob carga de 40 t. Mesmo que a verdadeira solicitação não coincida com 40 t (estatisticamente improvável), será justo dizer que temos  $CS = \frac{60}{40} = 1.5$

também neste caso, quando o numerador é conhecido como  $\geq 60$ ? Neste caso temos um:

$$CG = \frac{Q_{max. já\ enfrentado}}{Q_{solicit. estimado}}$$

e como  $Q_{rut} \geq Q_{max. já\ enfrentado}$ , temos certeza da não ruptura sob a carga máxima. Assim, quando um elemento já resistiu a uma solicitação maior, não se trata de um CS e sim de um CG.

### Princípios básicos de projeto de qualquer obra

Aplicação a represamentos: Reiterando pronunciamentos anteriores, postulo a necessidade de liminarmente distinguir entre comportamentos da Estatística de extremos, e os de médias. Perante os primeiros, a única política sábia de projeto é mudar o modelo físico dentro do possível, para excluir o comportamento extremo, em tal categoria situam-se problemas de erosão-cavitação, problema de *ping*, problema de ruptura por tração

etc. Cabe, ainda, distinguir entre fenômenos gerados localizadamente em condição extrema, mas com tendência à criação automática de fatores estabilizantes, comparados com os de tendência inexoravelmente degenerativa até ruptura de proporções significativas.

Dentro de fenomenologia em que imperam médias, sujeitas às teorizações e aos cálculos, o importante é procurar a homogeneidade (modelo mental simples) ou pelo menos um conhecimento quantificado de médias e dispersões, com variações definidas por funções e relações causa-efeito. "Homogeneidade" era tida como indispensável aos cálculos da engenharia convencional; por um lado, ilusão, pois confeccionar um material homogêneo não lhe confere um comportamento homogêneo; por outro lado, com a computação, passou a ser totalmente desnecessário restringir análises-sínteses da engenharia às hipóteses super-simplistas homogêneas, lineares etc.

Em resumo, precisamos primeiro ter segurança da teorização disponível. Assim, o pouco convencional seria aquilo que extravasasse das disponibilidades de teorização do projeto-análise-síntese-decisão. A seguir, precisamos ter confiança na previsão do comportamento do material em questão: este aspecto\* poderá ser subdividido em duas partes: a do conhecimento de corpos de prova e/ou modelos ideais, e a outra, a do conhecimento da massa resultante em obra em função do processo construtivo. Visto que não costuma se cogitar o emprego de um material que nem sequer se conheça idealmente em laboratório, o importante passa a ser a interveniência do processo construtivo na condição do material, tanto no tocante ao comportamento médio como no tocante às dispersões. Assim, o pouco convencional compreenderia emprego de material e/ou processo construtivo que leve a uma condição pouco previsível, e demasiadamente errática.

Para um julgamento razoável, precisamos analisar a evolução (ou, por vezes, involução) histórica. Salvo nos países de importação servil de tecnologia no início vem a experimentação (em escala modesta, de riscos e impunidades pequenas) e aceitação lata. Com os insucessos estabelecem-se os modelos mentais e teorizações. Em função da teoria, em seu início, vem a grande restrição, para enquadrar nas idealizações do modelo mental. Finalmente, à medida em que a teoria avança e consegue tratar de casos menos comuns, ampliamos o campo de aplicação. Se não houver conhecimento teórico, longe de estarmos inovando

em situações "pouco convencionais", estaremos repetindo, com maior timidez, o que já era comum. Citemos como alguns exemplos pertinentes trabalhos de há mais de 25 anos tais como: *Construction Technique of passing floods over earth dams* ASCE, Oct. 1950; *Earth overflow dike, Jim Woodruff Dam*, ASCE, Jul. 1953; *Trafficability of soil as related to mobility of vehicles*, ASCE, Nov. 1953: todos de importância permanente aos temas ora em pauta.

Permito-me um reparo a uma afirmação do Comité Francês de Grandes Barragens (México 1976, Vol. 1, p. 69): "Qui peut le plus, peut le moins... construire est souvent plus facile que réparer"...; afirmação está empregada (validamente) para apoiar a algumas técnicas inovativas que os franceses têm lançado com muito mérito.

Sempre que enfrentamos condições da estatística de médias (ex. estabilidade de talude) é óbvio que uma técnica favorável à estabilização de um talude instabilizado (ex. drenagem) é, a "fortiori", útil e mais fácil em projeto e construção para evitar a instabilização potencial. Porém, no caso de fenômenos localizados, da estatística dos extremos, a afirmação não é válida: é muito mais fácil reparar, depois que a natureza revelou seu ponto estatisticamente mais fraco, do que projetar para obviar a todo e qualquer elo fraco.

Assim, um dos pontos importantes de projeto passa a ser a estimativa da eventual rapidez de degeneração até a ruptura catastrófica, em contraposição com a disponibilidade de uma porta aberta, e de tempo, para medidas corretivas. Assim, o pouco convencional passaria a ser aquilo que permitisse uma degeneração rápida até a ruptura significativa ou catastrófica. Um projeto tal como o da barragem de Teton, aparentemente convencional e repetidamente empregado seria qualificado de errado.

#### Problemas inexoráveis de projeto de barragens e parâmetros respectivos

Julgo que não caiba discussão quanto aos principais itens convencionais de análise de projeto, conforme abaixo relaciono. A fim de suscitar os debates dos participantes, tomo a liberdade de adiantar algumas afirmações sobre o grau de conhecimento disponível, inclusive sem grande necessidade de ensaios específicos.

**Estabilidade:** resistência ao cisalhamento, coesão paramétrica, resistência à tração, problemas de liquefação sob sollicitação dinâmica (sísmica). Embora

na rotina de projetos estejam sendo empregados ensaios convencionais de resistência ao cisalhamento que pouco tem a ver com o comportamento do maciço, podemos afirmar que equações de resistência em função de pressões efetivas podem ser bastante bem estimadas, independentemente de se tratar de aterro argiloso compactado, aterro depositado em água, ou aterro hidráulico. A condição mais difícil é justamente a do aterro que chamarei de supercompactado, inexoravelmente resultante de equipamentos modernos exageradamente pesados (cargas e pressões de pneus): seriam tais aterros supercompactados os convencionais, muito embora nos últimos 25 anos se tenha insistido quanto a problemas de fissuramento (por tração) de aterros demasiadamente rígidos para os recalques diferenciais? Que danos sofreram os aterros mais modestamente compactados em condição relativamente úmida, inclusive os núcleos de barragens *puddled-core* (inglesas) e *Swedish wet compaction*?

A coesão paramétrica é indiscutível em muitos materiais. Revela-se até em aterros hidráulicos de areias puras, e em enrocamentos. Quanto à coesão eventualmente não ser permanente em argila plástica pré-adensada, só cabe desconfiar que quando o estado de tensões permita o inchamento, quer quando o coeficiente de segurança perante deslizamento for tão baixo que ocorra acentuada deformação cisalhante.

Resistência à tração deve ser considerada nula em condições de obra. Elo mais fraco da estatística dos extremos.

Liquefação a considerar em aterros depositados em água, aterros hidráulicos, barragens de rejeitos. Assunto intensamente estudado mas ainda muito discutido, justamente porque não ocorre com frequência.

**Compressibilidade, deformabilidade.** Razoavelmente fácil de se estimar quer para aterros compactados quer para aterro depositado dentro d'água e aterro hidráulico. As diferenças fundamentais residem na pressão de pré-adensamento correspondente a determinada densidade inicial, e à "porosimetria de ar" que controla rapidez de compressão, sobrepressões neutras, infiltração. Obviamente o ideal é contar com muito ar, preferivelmente em menor número de bolhas maiores. Não me parece que haja desconhecimento no assunto.

Sabidamente os ensaios convencionais (mesmo de campo, tais como provas de carga de placas) indicam compressibilidade bem maiores (digamos da ordem de 3 vezes) do que as de

campo; portanto as análises convencionais atuais, baseadas em ensaios de laboratório etc., levam a valores pessimistas e temores descabidos.

**Permeabilidade** e principalmente permeabilidades relativas, para controle de pressões neutras, redes de percolação, subpressões etc. Se não fosse por questão de *segregação* diríamos que permeabilidades podem ser facilmente estimadas. Acontece, porém, que a *segregação* seria atualmente o problema construtivo menos investigado ou conhecido, sendo apontado como responsável por grande número de dissabores e mesmo rupturas (catastróficas). Na medida em que as condições operacionais de um represetamento enfrentem gradientes hidráulicos desfavoráveis e bem diferentes e/ou maiores do que os enfrentados em período construtivo, este é um aspecto pelo qual alguns projetos e métodos construtivos deverão ser liminarmente qualificados de errados, mesmo que casos semelhantes tenham sobrevivido aparentemente sem dissabores. Examinem-se algumas variantes convencionais de barragens de rejeitos e de enscadeiras, entre outras, sob este prisma e verem os quais são as conceitualmente erradas.

**Erosão - externa e interna (piping).** A erosão externa já se encontra bastante estudada em hidráulica (revestimento de canais etc.) em hidráulica marítima (quebra-mares etc.): fórmulas e ensaios e observações põem em evidência a importância da coesão, do ângulo de atrito (imbricado) e do peso dos blocos.

Caberia indagar quanto à aplicabilidade de solo-cimento como proteção de talude? A resistência à compressão simples (e coesão) de solo-cimento está fartamente estudada, não só no campo ora em consideração, mas também para estradas etc. O U.S.B.R. empregou proteção de montante em caráter experimental em protótipo (Bonny Dam) há mais de 25 anos, e em 1976 (ICOLD México, vol. 1 p. 261) fornece uma relação de 64 barragens com emprego de tal tratamento. Há cerca de doze anos que venho propondo tal emprego experimental pelo menos em trechos finais, rasos de uma barragem junto às ombreiras: mas não me consta ter sido acatada a sugestão. Determinada barragem pode bem ser encarada como uma sucessão de barragens em trechos longitudinais, favorecendo estudos comparativos: há necessidade, porém, de encarar com entusiasmo a dinâmica da experimentação e observação em obra.

Enquanto que a vantagem do solo-cimento é óbvia no tocante à coesão conferida, a desvantagem, do rapidísim-

simo enriquecimento constitui a grande limitação ao uso em barragens de solo-cimento, não caberá usar salvo em situações em que os recalques totais e diferenciais sejam bem pequenos.

Caberá mencionar como pouco convencional o caso das pequenas barragens de "terra armada" (ICOLD, Madrid 1973, barragem de Vallon des Bimes, e ICOLD, México 1976, barragem de l'Estelle etc.) como barragens-vertedouras? Obviamente enfrentam o problema da estabilidade da face subvertical de jusante (terra armada) e da erosão da soleira vertente. Problemas facilmente equacionáveis por teoria, equações e parâmetros disponíveis.

Quanto ao problema da erosão interna, *piping*, também podemos afirmar que a teorização respectiva estaria razoavelmente definida, embora com aplicação estatística um tanto por desejar ainda. As pressões de percolação seriam as responsáveis pela tendência ao carreamento, pelo menos em valor médio e direção média tais pressões são conhecidas, e convém que tenham tendência à compressão e não ao alívio de pressões ou eventual tração. Admitindo que não haja alteração

no diâmetro dos poros, o princípio do filtro é o de um bloqueio estereométrico do diâmetro da partícula arrastável, por um diâmetro menor de poro do filtro. O assunto foi muito discutido no Congresso Europeu ECSEMF de Brighton, 1979, por causa de rupturas ocorridas por *piping* de bases de plataformas-gravidade oceânicas, a despeito de cuidadosamente projetados e executados filtros de proteção, aparentemente a variação cíclica de estados e direções de tensões gerada por ondas não permitiu a criação de arqueamento estabilizador do material de fundação, após início de carreamento (probabilisticamente inescapável).

A meu ver, precisamos ainda melhorar nossos processos de determinação de porosimetria de filtros, mas, em particular, precisamos dar mais atenção aos estados de tensão (de compressão) capazes de garantir a estabilização do carreamento, após um local de algumas partículas mais finas do que os poros contíguos do filtro (cf. Rankine Lecture, e discussões, vol. 3 Congresso de Brighton 1979). Um dos desafios mais importantes de processos construtivos reside na necessidade de evitar a tendência de segregação pela qual os materiais mais grosseiros de

uma camada de transição depositam-se justamente na interface.

#### *Problemas de obras diversas.*

Quais seriam os problemas de obras diversas, seja as barragens de terra pouco convencionais, seja as enseadeiras de materiais terrosos-pedregosos, seja as barragens de aterro hidráulico, seja os aterros depositados dentro d'água, seja as barragens de rejeitos, seja as barragens submersíveis, seja a proteção de taludes (perante erosão) com materiais e processos pouco usuais, seja finalmente as barragens de solo-cimento, que não seriam atendidas pelas ferramentas de análise providas pela hidráulica e mecânica dos solos, e pelos parâmetros quer estimáveis em primeiro grau de aproximação, quer determináveis por ensaios? Ademais de publicações específicas de mecânica dos solos e de barragens, sugerem-se as de campos afins tais como transporte de sedimentos e sedimentação, hidráulica fluvial e oceânica, revestimentos de canais, dragagem e aterros hidráulicos de produtos dragados, e assim por diante. É tão farta a bibliografia provedora de dados, que a única forma de tirar proveito é conca-tenar tais dados perante a teoria. ●

ka carreamento

## SINOPSES

### **"Alguns dados sobre as características de operação do sistema de deposição de rejeitos e lamas da Araxá S.A. Fertilizantes e Produtos Químicos"**

Carlos Manoel Nieble, Henrique L. de Castros e Leonardo de F. Lamy.

O sistema de deposição de rejeitos e lama de Araxá S.A. Fertilizantes e Produtos Químicos, envolve a construção de três barragens, necessárias para estocagem dos resíduos durante os 10 primeiros anos de operação da usina. Em particular, uma dessas barragens, com 52 m de altura final, está sendo alteada com os rejeitos de fosfato, pelo "método da linha de centro modificado", a partir de um dique inicial de 24 m de altura. Este trabalho apresenta, em linhas gerais, a concepção de projeto utilizado, bem como os dados relativos ao controle tecnológico dos rejeitos depositados a montante e jusante do dique inicial.

### **"Emprego de técnicas e materiais não convencionais em estudo de pequenas usinas hidrelétricas na Amazônia"**

Akira Koshima, João Carlos de B. Hoenisch, Lineu Asbahr e Riusuke Sakamoto

O presente trabalho consubstancia um enfoque metodológico básico, visando a elaboração de estudos de aproveitamento hidro-

energético de baixa queda nas pequenas bacias da Amazônia, cuja realização teve como fundamento a experiência vivida pela equipe em trabalhos empreendidos nessa região. Apresenta, ao mesmo tempo, os resultados dos estudos realizados, que tiveram por objetivo a concepção de estruturas-tipo componentes dos barramentos, visando a utilização, tanto quando possível, dos materiais naturais de construção disponíveis na região, e a sua aplicação em dois aproveitamentos preestabelecidos, Humaitá e Eirunepé, os quais apresentam características opostas, com relação principalmente a acessos e infra-estrutura. A importância que assumem esses dois aproveitamentos é notável, não só pelas suas peculiaridades, mas principalmente pelo fato de poderem se tornar obras pioneiras no gênero, a partir das quais se poderá extrair subsídios que irão nortear o procedimento futuro, no que diz respeito à implantação de usinas desse tipo na região amazônica.

### **"Perspectivas de construção de barragens em aterro hidráulico no Brasil"**

Serge J.C. Hsu e Arsênio Negro Jr.

O desenvolvimento histórico de barragens em aterro hidráulico nos países ocidentais e na URSS é revisto. Barragens em aterro hidráulico "homogêneas" e o desenvolvimento da técnica é descrito sucintamente. É demonstrada a viabilidade técnico-econômica destes tipos de barragens em aproveitamentos hidrelétricos em rios de planícies sedimentares.