

DISCUSSÃO DE “ANÁLISE NUMÉRICA DE SOLOS NÃO SATURADOS COLAPSÍVEIS: APLICAÇÃO EM UMA PEQUENA BARRAGEM DE TERRA EXPERIMENTAL”*

Discussion on “Numerical analysis of collapsible unsaturated soils: application to a small experimental dam”*

E. Maranha das Neves^a

^a Professor Catedrático Jubilado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

Os autores apresentam uma análise numérica do comportamento estrutural, durante e após o primeiro enchimento, de uma barragem de terra experimental com dimensões muitíssimo reduzidas (4,6 m de altura, desenvolvimento de 73,5 m, volume 1900 m³ e inclinação de ambos os paramentos igual 1,5H:1V). Foram calculadas deformações de colapso dos solos devido ao aumento do grau de saturação resultante do enchimento do reservatório. Não obstante, como o título indica, o estudo se debruçar sobre modelação numérica, o objetivo principal é o de justificar uma solução estrutural original para pequenas barragens de aterro, em regiões semiáridas, com menores custos, mas segura.

Com esta finalidade, comparam os resultados de análises numéricas, aplicadas com base nos conceitos da hidromecânica dos solos não saturados (conceitos sobre os quais os autores se debruçam, já que os consideram indispensáveis para demonstrar a segurança da solução estrutural que propõem), com o comportamento que teria sido observado na barragem experimental desde o início do enchimento do reservatório até ao estabelecimento de um regime de percolação permanente correspondente ao pleno armazenamento.

Finalmente concluem, com base nessa comparação, que, em regiões semiáridas, a construção de pequenas barragens de terra adotando a solução estrutural proposta, pode proporcionar economias na construção sem comprometer a segurança da obra.

A ESTRUTURA EXPERIMENTAL E A QUANTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS USADOS

Como já se disse, o objetivo dos autores é o da comprovação de que os procedimentos propostos por Miranda (1988), há mais de 30 anos, para o projeto de pequenas barragens de aterro, são uma solução económica e que confere à barragem a segurança adequada. Os referidos procedimentos consistem basicamente em, usando o mesmo tipo de solo em todo o corpo da barragem, recorrer, no solo do núcleo, a uma energia de compactação leve (Proctor Normal) com um teor em água ótimo e compactar o dos espaldares (zonas estabilizadoras) com a mesma energia específica de compactação mas com um teor em água correspondente a um desvio substancial no sentido do ramo seco da curva de compactação.

* Por/by: José Neto, Francisco Silva Filho, Caio Lopes (Geotecnia 144, Nov. 2018, pp. 5-19, <http://doi.org/10.24849/j.geot.2018.144.02>)

Quantificando as condições de compactação do aterro experimental, o núcleo foi construído de modo obter-se $\gamma_d=18,4 \text{ kN/m}^3$ e $w=14,7\%$, valores correspondentes, respetivamente, ao peso volúmico seco máximo e teor em água ótimo obtido do ensaio de compactação leve (Proctor normal). Já para os aterros estabilizadores de montante e jusante, as condições de compactação foram $\gamma_d=15,5 \text{ kN/m}^3$, $w=9,6\%$.

Tal significa que a compactação no lado seco corresponde a uma compactação relativa de 84% (!) e a um desvio para o lado seco do teor em água em relação ao ótimo igual a 5,1% (!). Em resumo, o núcleo é bem compactado e os aterros estabilizadores, como é mencionado em 4.2 do artigo, são mal compactados.

Ora em toda a literatura relativa a regulamentos de segurança de pequenas barragens de terra é estritamente recomendado que todos os aterros devem ser bem compactados (podiam citar-se dezenas de regulamentos de vários países, mas refere-se apenas a publicação da ICOLD (2010) sobre as pequenas barragens, já que esta organização internacional reflete a opinião da generalidade dos países, bem como a publicação da FAO, de Stephens (2010), por se debruçar sobre a experiência mundial com barragens de aterro de pequena altura, em regiões climáticas as mais diversas.

Ainda de acordo com a generalidade das normas internacionais sobre a segurança de pequenas barragens (USBR, 1987; ICOLD, 2015, entre muitos outros), estas podem ser dimensionadas através de medidas prescritivas, sobretudo com base no conhecimento da classificação dos solos (ASTM D2487-11, 2011) a usar na construção do aterro e no tipo de terreno de fundação. Pode, por exemplo, encontrar-se a justificação de muitas dessas medidas prescritivas em Maranha das Neves *et al.*, (2015). Estranha-se não haver sequer menção da classificação do solo da barragem experimental, pelo menos para poder comparar o que resultaria da aplicação de medidas prescritivas ao dimensionamento da barragem experimental. Mas, em caso algum, as inclinações prescritas para os taludes de montante e jusante das pequenas barragens atingem valores como os usados na barragem experimental, isto é, 1,5H:1V.

Os autores limitam-se portanto a concluir que os resultados dos cálculos suportam a observação visual da estrutura (para o que apresentam, na figura 16, uma fotografia do aterro ao fim de 8 meses), não se descortinando qualquer justificação para esta conclusão já que não se efetuaram (ou não foram apresentadas) nenhuma medições que permitissem comparar as deformações calculadas, com as verificadas na barragem experimental.

MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO ATERRO

Para determinar o comportamento tensão-deformação com vista à previsão do colapso do solo não saturado, foi usado o código académico UNSTRUCT e foi admitido que o material tinha uma resposta elástica linear, com o argumento de que os níveis de tensão são muito reduzidos. Esta simplificação contrasta com a preocupação sugerida em recorrer a conceitos e formulações que se aproximam mais da realidade, não podendo deixar de salientar-se que o colapso, como há muito é sabido, está associado fundamentalmente a deformações plásticas (Leonards, 1962) e que o problema da modelação do colapso só foi adequadamente tratado quando o solo não saturado foi tratado como um material elastoplástico com endurecimento (Alonso *et al.*, 1990). Mas esta observação não deve ser entendida como uma sugestão nossa para o uso destes modelos numa barragem experimental com estas características.

A consideração do estado não saturado do solo na modelação da percolação e do comportamento tensão-deformação do corpo da barragem experimental, parece mais motivada pela necessidade de dispor de um caso experimental para realizar um trabalho académico de modelação numérica, tirando partido de programas que envolvem a consideração do estado de não saturação no estudo da percolação e do comportamento deformacional do corpo da barragem. Mas não se revelam uma opção ajustada ao objetivo do trabalho: validar a solução estrutural preconizada.

Presumir que, por uma aplicação de formulações que têm em atenção o grau de saturação inicial e a saturação, se está a usar uma modelação mais próxima da realidade, é contrariada, nesse objetivo,

pela não consideração da fundação da barragem nas análises efetuadas (comparar as figuras 4 e 5). É assumida uma fronteira rígida e impermeável. Este aspeto descredibiliza fortemente o resultado da modelação e contrasta com a preocupação duma aproximação à realidade ao considerar o aterro como um solo não saturado.

Na modelação da percolação transitória no aterro não saturado associada ao enchimento, foi usado um programa comercial (Slide 6.0, da Rocscience). Com base na literatura, a relação admitida entre a condutividade hidráulica dos aterros do núcleo e dos espaldares, poderia variar entre 0,1 e 0,01 tendo os autores arbitrado 0,1. Esta opção não justificada, tem significativa influência nos tempos da análise da percolação transitória.

Não pode deixar de salientar-se que o colapso, como há muito é sabido, está associado fundamentalmente a deformações plásticas (Leonards, 1962) e que a modelação do comportamento deformacional dos solos não saturados teve grandes avanços quando foi tratado como um material elastoplástico com endurecimento (Alonso *et al.*, 1990). Esta observação não deve ser entendida como uma sugestão para o uso destes modelos na pequena barragem experimental em causa.

A ESTABILIDADE ESTRUTURAL

Como é sabido, no que respeita à segurança, as estatísticas mostram que os estados limite últimos relevantes nas pequenas barragens de terra correspondem à rotura por galgamento (não relevante no caso deste trabalho) e por erosão interna afetando o corpo da barragem e/ou a sua fundação (ICOLD, 2015).

Se as barragens não forem adequadamente projetadas e construídas para controlar a erosão interna, esta pode ocorrer devido à percolação através de fendas resultantes de assentamento do aterro e da fundação. As partículas de solo da barragem ou da sua fundação são transportadas para jusante pelo escoamento da água e tal transporte pode iniciar-se por um escoamento concentrado, por erosão regressiva, por sufusão, e por erosão paralela de contacto. A erosão interna pode assim dar início à formação de uma brecha no corpo da barragem de que resulta uma libertação descontrolada da água do reservatório (rotura da barragem).

A percolação no espaldar de jusante, independentemente das condições postuladas para as fronteiras e para a relação das permeabilidades, vai sempre ocorrer e como “a barragem experimental não tem nenhum sistema de drenagem interna” estão criadas condições para a ocorrência de erosão interna. Como se disse, o solo do espaldar, mal compactado, vai fissurar e proporcionar, num prazo mais ou menos longo, erosão interna do núcleo e possibilidade de ocorrência de um estado limite último da estrutura (rotura).

No caso da barragem experimental, como é dito no próprio artigo que “a barragem construída não tem nenhum sistema de drenagem interna, pois o intuito da pesquisa era apenas estudar o problema de colapso do solo mal compactado”, é grande a probabilidade da erosão se iniciar no contacto do núcleo com o espaldar de jusante, dadas as fissuras que nesta zona ocorrem em virtude do muito baixo grau de compactação usado na sua construção. Ora dada a importância da erosão interna na segurança das pequenas barragens de terra, pode concluir-se que a não consideração deste requisito implica que o trabalho em análise não pode na verdade ter tido o intuito de validar a segurança da solução estrutural proposta.

Acontece ainda que, embora a rotura por ausência de condições de estabilidade da estrutura para a situação de projeto, a longo prazo, correspondente ao pleno enchimento do reservatório, não seja, estatisticamente, tão relevante em matéria de segurança quanto o galgamento e a erosão interna, tal situação de projeto, bem como o papel resistente do aterro do espaldar de jusante, não podem ser ignorados. É por isso estranho que este trabalho, bem como todas citações apresentadas, se centrem unicamente na zona do espaldar de montante. A menos que haja uma explicação plausível, não se descortinam razões pelas quais a zona de jusante não seja considerada. É indubitável que as consequências resultantes de uma rotura afetando o espaldar de montante associada ao esvaziamento

do reservatório, não são comparáveis com os efeitos a jusante de uma rotura com o reservatório cheio.

Saliente-se antes que o trabalho trata de uma análise de deformações, mais ligada portanto à funcionalidade. Mas a segurança tem que ver com a estabilidade, o que é muito relevante para a recomendação do recurso a esta solução estrutural. No entanto, a única referência a este aspeto está nas duas últimas linhas do trabalho: “*Vale ressaltar, que Melo Neto apresenta em seu trabalho análise de resistência do maciço estudado, mostrando resultados que apontam a sua estabilidade*”. Pergunta-se: quais as características de resistência adotadas? A jusante foi tida em conta a componente devida à sucção e em que condições? Como os paramentos inclinam 1,5H:1V, considerando um coeficiente global de segurança igual a 1,5 (ICOLD, 2010), tal implicaria um ângulo de resistência ao corte efetivo, ϕ' , $\approx 45^\circ$ (!).

Pode argumentar-se que o estado de não saturação, conducente à instalação de sucções, tem uma contribuição para a resistência ao corte. Mas é igualmente verdade que esta contribuição não é proporcional ao valor da sucção e, muito mais importante, esta contribuição, qualquer que seja, desaparece com a saturação. E a saturação verifica-se a montante logo que ocorre o enchimento e a jusante devido à percolação no corpo do aterro e fundação. É por este motivo que se não for garantida a permanência do estado de não saturação, não deve ter em conta a sucção numa análise da resistência ao corte. E daí que se verifique um reduzido interesse prático do estudo do comportamento resistente dos solos não saturados, verificando-se precisamente o contrário com o seu comportamento deformacional.

Acontece ainda que as dimensões da barragem experimental são muito condicionantes da possibilidade de se tirarem conclusões aplicáveis ao conhecimento do comportamento de pequenas barragens de terra (que se admite poderem ter uma altura de 15 m). Como é sabido, o comportamento mecânico dos solos depende muito do estado de tensão, o qual, no aterro experimental é muito reduzido. A figura 2 mostra que no ensaio de adensamento se atingiram tensões de 400 kPa, quando as tensões máximas verticais no maciço estabilizador de montante são da ordem de 10 kPa (ver Quadro 2, elemento 42). Por alguma razão os modelos físicos reduzidos não podem ser usados na mecânica dos meios particulados. Mas poderiam sê-lo, se o seu comportamento fosse elástico.

Não se pode pois afirmar que a análise efetuada valida a solução estrutural proposta.

NOTA FINAL

Os nossos comentários incidem sobretudo na solução estrutural que é proposta. Para além de certas incongruências que foram atrás apontadas, também não é possível descortinar a contribuição específica deste estudo para a credibilização da solução estrutural sugerida. Como é sabido, a aceitação pela comunidade internacional das práticas resultantes de progressos no domínio do projeto e construção das barragens, dada a perigosidade destas obras, reveste-se sempre de grande prudência. E tratando-se de uma solução estrutural sugerida há mais de 30 anos, esta não é abordada nos documentos de regulamentação e normalização que tratam da segurança aceites pela comunidade internacional, nem o artigo refere barragens em que estas ideias tenham sido aplicadas com sucesso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E. E., A. Gens & A. Josa (1990). *A constitutive model for partially saturated soils*, *Géotechnique*, 40, 3, pp. 405-430.
- ASTM D2487-11 (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Classification System)*, ASTM, International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org.

- ICOLD (2010). *Small Dams – Design, Surveillance and Rehabilitation*, Ad hoc Committee on Small Dams.
- ICOLD (2015). *Internal erosion of existing dams, levees and dikes and their foundations*, Bulletin 164, vol. 1: Internal erosion processes and engineering assessment.
- Leonards, G. A. (1962), *Correspondance*, Géotechnique, 12, pp. 354-355.
- Miranda, A. N. (1988), *Behavior of small dams during initial filling*, Ph. D. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Maranha das Neves, E., Caldeira, L., Pinheiro, A., (2015). *Projeto, Construção e Observação de Pequenas Barragens de Aterro*. IST Press, IST, Universidade de Lisboa.
- Stephens, T. (2010). *Manual on small earth dams – a guide to siting, design and construction*. Food and Agriculture Organization (FAO), United Nations, Rome.
- USBR, U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1987). *Design of Small Dams*.