INFLUÊNCIA DOS FILTROS INTERNOS NA PREVENÇÃO DE PIPING EM BARRAGENS DE TERRA: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM JABURU I

Amanda Fontenelle de Vasconcelos [1] & Jefferson Sousa Rocha [2]

Palavras-Chave – Barragens de terra; piping; filtros internos; erosão interna; geotecnia.

INTRODUÇÃO

No semiárido nordestino, a regularização da oferta de água depende, em boa parte, de uma extensa malha de barragens de terra, soluções que conciliam custo de implantação relativamente baixo com boa adaptação aos solos e relevos da região. No Ceará, essas estruturas sustentam o abastecimento urbano, a irrigação e a perenização de rios intermitentes, e seu desempenho ao longo das décadas tem moldado, em boa parte, a própria gestão estadual dos recursos hídricos.

Apesar dessa importância, barragens de terra permanecem sujeitas a mecanismos de ruptura ligados ao comportamento hidráulico do maciço e da fundação. Entre eles, a erosão interna, conhecida como piping, é apontada de forma recorrente como uma das causas mais frequentes de acidentes graves nesse tipo de obra (FELL et al., 2005; ICOLD, 2013). O processo se instala quando o fluxo percolante passa a arrastar partículas finas do solo, abrindo canais internos que se ampliam progressivamente e comprometem a resistência do maciço. Os sinais iniciais nem sempre são evidentes (surgências discretas, pequenas variações de turbidez, depressões localizadas no terreno), o que torna o monitoramento contínuo tão importante quanto o próprio projeto da obra.

É nesse ponto que os filtros internos cumprem sua função: permitir a passagem da água percolante sem deixar que ela carregue consigo as partículas finas do solo adjacente. Associados a tapetes e trincheiras drenantes, eles controlam a posição da linha de saturação no interior do maciço e ajudam a dissipar as poropressões geradas pelo fluxo, dois fatores diretamente ligados à estabilidade do talude e que aparecem repetidamente entre as causas de acidentes registrados mundo afora.

Esse panorama de risco não é apenas teórico no caso da barragem aqui estudada. A Barragem Jaburu I, construída entre os municípios de Ubajara e Tianguá, na Serra da Ibiapaba (CE), e concluída em 1983, é hoje a única, entre as 89 barragens geridas pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (Cogerh), classificada com risco alto no Relatório Anual de Segurança de Barragens de 2024. Em 2022, uma nota técnica da própria companhia já havia registrado, a cerca de 80 m do talude da barragem, uma “anomalia de fuga d’água com carreamento de material”, um indício direto de erosão interna em curso, tratado então com injeção de calda de cimento na fundação (SRH-CE, 2022). Diante desse histórico, entender como os sistemas de filtro e drenagem da obra foram concebidos, e onde falharam, ganha um interesse que vai além do acadêmico.

Este artigo tem como objetivo analisar a influência dos filtros internos na prevenção do piping em barragens de terra, a partir do estudo de caso da Barragem Jaburu I. Buscou-se, com base no projeto executivo de recuperação da estrutura, relacionar os problemas de percolação identificados na obra com o desempenho dos sistemas de filtragem e drenagem projetados e executados, situando essa discussão dentro do referencial técnico consolidado sobre o tema.

1) Faculdade Luciano Feijão (FLF), amanda16fontenelle16@gmail.com
2) Faculdade Luciano Feijão (FLF), jeffersonsrocha@outlook.com

METODOLOGIA

A pesquisa tem caráter bibliográfico e qualitativo, organizada em duas frentes complementares. Na primeira, revisaram-se referências consolidadas em geotecnia de barragens, tratando dos mecanismos de piping, da percolação em maciços terrosos e do dimensionamento de filtros granulares, de modo a estabelecer o quadro conceitual que orienta a leitura do caso.

Na segunda frente, analisou-se a documentação técnica do Projeto Executivo de Recuperação da Barragem Jaburu I, elaborado pela empresa COBA para a Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará (SRH) em 2000. Foi consultado, em particular, o tomo referente às intervenções de estabilização e drenagem do corpo da barragem, que reúne o diagnóstico dos problemas identificados na obra (surgências, zonas saturadas, leituras piezométricas) e o detalhamento das soluções de filtro e drenagem propostas para cada uma das três zonas críticas da estrutura.

A leitura desse material privilegiou a identificação de evidências de percolação preferencial e de possível deficiência dos filtros existentes, além do levantamento das características técnicas dos elementos drenantes projetados (geometria, materiais, critérios de filtro) e dos ganhos de segurança proporcionados por essas intervenções, expressos pelos coeficientes de segurança recalculados para as seções mais críticas. Complementarmente, recorreu-se a notas técnicas e comunicados oficiais mais recentes da Cogerh e da SRH para situar o estado atual da obra e verificar em que medida os problemas de percolação identificados em 2000 persistem, ou se manifestam de outra forma, duas décadas depois.

RESULTADOS

Convém abrir esta seção retomando, ainda que brevemente, o papel técnico dos filtros internos: impedir o transporte de partículas finas do solo protegido sem reduzir de forma relevante a capacidade de drenagem do conjunto. Essa função depende de uma compatibilidade granulométrica cuidadosa entre o material do filtro e o solo adjacente, pois um filtro grosso demais permite a passagem das partículas finas; um filtro fino demais, ou colmatado, perde sua capacidade de drenagem e passa a represar a água no interior do maciço, elevando as poropressões. Essa segunda situação, frequentemente deixada em segundo plano nas discussões mais gerais sobre piping, revelou-se central no caso da Barragem Jaburu I.

O projeto original da barragem, concluído em 1983, já incorporava um filtro sub-vertical (tipo filtro-chaminé) associado a um tapete misto filtrante-drenante na fundação, concebido para captar a percolação do núcleo argiloso e conduzi-la, de forma controlada, para fora do maciço. Ainda no ano de conclusão da obra, porém, surgiram fissuras no coroamento ao longo do alinhamento desse filtro, seguidas por um recalque de cerca de 0,5 m no aterro, na zona do vale principal, um indício precoce de que o sistema de drenagem interna não respondia como previsto.

As investigações conduzidas no âmbito do projeto de recuperação de 2000 reforçam essa leitura. As sondagens SPT identificaram, tanto no núcleo argiloso quanto no aterro de laterita, camadas intercaladas de consistência e permeabilidade bastante distintas, uma heterogeneidade que cria caminhos preferenciais de percolação dentro do próprio maciço. Os perfis instrumentados com piezômetros, nas estacas 21, 23 e 25, confirmam essa hipótese: em mais de um caso registraram-se níveis piezométricos mais elevados do que seria esperado se o tapete drenante estivesse funcionando plenamente, levando os autores do projeto a admitir, explicitamente, que a areia do filtro sub-vertical poderia estar parcial ou totalmente contaminada, ou possuir características inadequadas à sua função (COBA, 2000).

A suscetibilidade ao piping na Jaburu I não se restringe ao aterro: a fundação também constitui um fator agravante. A barragem está implantada sobre os sedimentos silúricos do Grupo Serra Grande,

formados por arenitos médios a grosseiros intercalados com siltitos micáceos friáveis, intensamente diaclasados por famílias de fraturas N-S e E-W (60–80°) e sub-horizontais, todas abertas e com vestígios de circulação de água em suas paredes (COBA, 2000). Ensaios Lugeon identificaram perdas superiores a 70 nas zonas de siltito, e a análise mineralógica dessas camadas revelou caulinita como mineral predominante, uma argila de baixa coesão facilmente carreada pelo fluxo percolante. Diante disso, o projeto de recuperação previu cortina de injeção de calda de cimento em dois trechos críticos da fundação (estacas E25–E29 e E10–E13) para reduzir as perdas para jusante e o risco de erosão interna nas camadas friáveis (COBA, 2000).

Essa hipótese de colmatação do filtro ajuda a explicar o quadro de surgências reconhecido na obra: uma vazão de cerca de 2 l/s numa caverna na ombreira esquerda do vale principal; uma surgência na mesma ombreira que, após o primeiro enchimento do reservatório em 1988, chegou a registrar cerca de 47 l/s antes de ser parcialmente controlada por tratamento de impermeabilização da fundação, estabilizando-se depois em torno de 2,2 l/s; e uma surgência adicional próxima à estaca 12, com vazão da ordem de 2,5 l/s, associada a camadas de arenito e siltito friáveis e muito fraturadas na fundação (COBA, 2000). A natureza geológica da fundação, composta por arenitos compactos intercalados com níveis de siltito alterado e erodível, cortados por famílias de fraturas abertas com vestígios de circulação de água em suas paredes, tornava essas zonas naturalmente mais suscetíveis à erosão interna, à parte qualquer deficiência dos filtros do aterro.

Diante desse diagnóstico, o projeto de recuperação definiu intervenções nas três zonas mais críticas: o vale principal, o vale secundário e o trecho a jusante entre as estacas 12 e 18. As soluções incluíram aterro de recarga em enrocamento no pé de jusante sobre camada de filtro de 0,5 m; esporões drenantes transversais revestidos em geotêxtil e preenchidos com brita (2 m de largura, 4 m de profundidade, espaçamento de 11,5 m), associados a máscara filtrante-drenante de 0,8 m sobre o coroamento do novo aterro; e trincheira drenante perimetral de 2,5 m de profundidade, revestida em geotêxtil, com tubo coletor de concreto poroso de 30 cm envolto em areia (COBA, 2000). Esses elementos repetem os princípios de Terzaghi, Peck e Mesri (1996) e de Sherard (1986): permitir a saída da água sem arrastar o solo que ela deveria apenas atravessar.

Os cálculos de estabilidade feitos para a seção da estaca 22, no vale principal, dão uma medida concreta do ganho de segurança trazido por essas intervenções: o coeficiente de segurança ao escorregamento, antes da ordem de 1,26 a 1,28, passou a variar entre 1,48 e 1,54 após a construção do aterro de recarga drenante, considerando os parâmetros de resistência mais prováveis para a laterita do maciço (COBA, 2000). Resultado semelhante foi obtido para os perfis das estacas 3 e 4, na zona da portela secundária.

Mesmo assim, o histórico recente da barragem sugere que o controle da percolação permanece um desafio em aberto. Em 2022, cerca de 22 anos depois da conclusão do projeto de recuperação aqui analisado, a Cogerh registrou uma nova anomalia de fuga d’água com carreamento de material, a cerca de 80 m do talude, novamente tratada por injeção de calda de cimento na fundação (SRH-CE, 2022). A classificação da Jaburu I como única barragem de risco alto entre as geridas pela companhia, segundo o relatório de segurança de 2024, e a elaboração, no mesmo ano, do primeiro Plano de Ação de Emergência para uma barragem cearense, sugerem que os problemas de percolação identificados desde a década de 1980 nunca foram inteiramente equacionados, e que manter a função filtrante dos drenos internos ao longo do tempo continua sendo, décadas depois, um fator determinante para a segurança da estrutura.

CONCLUSÕES

O caso da Barragem Jaburu I mostra, de forma bastante concreta, que a segurança de uma barragem de terra depende não apenas da existência de filtros internos, mas do funcionamento continuado

desses elementos ao longo de toda a vida útil da obra. As fissuras observadas já em 1983, junto ao filtro sub-vertical, e a hipótese, levantada vinte anos depois, de contaminação ou inadequação granulométrica desse mesmo filtro, mostram que problemas de drenagem interna podem se instalar precocemente e permanecer pouco percebidos até se manifestarem como surgências, zonas saturadas ou, no limite, processos de erosão interna mais avançados.

As intervenções de estabilização e drenagem implementadas a partir do projeto de 2000, aterros de recarga filtrantes, esporões drenantes, máscaras filtrantes e trincheiras perimetrais, seguiram os critérios clássicos de compatibilidade granulométrica entre filtro e solo protegido, e produziram ganhos mensuráveis de segurança, evidenciados pelos coeficientes de estabilidade recalculados para as seções mais críticas. Esses resultados confirmam, na prática, a relevância dos princípios discutidos por autores como Terzaghi, Sherard e a própria ICOLD para o dimensionamento de filtros em barragens de terra.

Ao mesmo tempo, a recorrência de anomalias de percolação na Jaburu I, inclusive em registros recentes, sugere que o correto dimensionamento dos filtros, por si só, não é suficiente: é preciso aliar esse cuidado a um monitoramento capaz de identificar precocemente sinais de colmatação, percolação preferencial ou deterioração dos elementos drenantes. Esse acompanhamento de longo prazo, tanto quanto o projeto inicial, parece ser o que efetivamente diferencia uma barragem segura de uma barragem vulnerável ao piping.

Como desdobramento deste trabalho, recomenda-se o desenvolvimento de estudos que aprofundem a investigação do estado atual dos filtros e drenos da Barragem Jaburu I, por meio de modelagem numérica da percolação, ensaios laboratoriais de compatibilidade granulométrica e análise da série histórica de leituras piezométricas e de vazão, de modo a verificar se as soluções implementadas em 2000 continuam desempenhando adequadamente sua função quase um quarto de século depois.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília: Diário Oficial da União, 2010.

COBA. Intervenções de estabilização e de drenagem: Projeto executivo de recuperação – Barragem Jaburu I, Tomo I – Barragem. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 2000.

COBA. Reforço do tratamento da fundação: Projeto executivo de recuperação – Barragem Jaburu I. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 2000.

FELL, R.; MACGREGOR, P.; STAPLEDON, D.; BELL, G. Geotechnical engineering of dams. Rotterdam: Balkema, 2005.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. Paris, 2013.

SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ (SRH-CE). Nota técnica atesta segurança da barragem Jaburu I. Fortaleza, 2022. Disponível em: srh.ce.gov.br.

SHERARD, J. L. Embankment dam cracking. Embankment Dams, ASCE, v. 2, p. 703–760, 1986.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. Soil mechanics in engineering practice. 3. ed. New York: Wiley, 1996.