DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/6

Análise de Fluxo e Estabilidade na Fundação da Barragem Olho d'Água: Comparação entre Alternativas de Projeto

Rosiel Ferreira Leme 1
Docente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, rosiel.leme@ufc.br

Fabiola Costa de Lima 2
Doutoranda, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, fabiolac.lima@alu.ufc.br

RESUMO: Este trabalho avalia o comportamento hidráulico e a estabilidade da fundação da Barragem Olho d'Água, localizada em Várzea Alegre–CE, considerando diferentes soluções de controle de percolação adotadas na fase de projeto e durante a operação. O objetivo é comparar o desempenho hidráulico e geotécnico de duas alternativas de projeto — o projeto básico da Aguasolos e o projeto executivo da CEC Engenharia — além da intervenção corretiva executada pela COGERH. A metodologia baseou-se em modelagem numérica bidimensional de fluxo e estabilidade, utilizando os módulos SEEP/W e SLOPE/W do software GeoStudio, com parâmetros obtidos a partir de dados de campo e laboratório. Foram analisados os padrões de fluxo, os gradientes hidráulicos de saída, os fatores de segurança contra piping e a estabilidade do talude de jusante em condição operacional. Os resultados indicaram melhor desempenho hidráulico no projeto básico, com menores gradientes e maiores fatores de segurança. O projeto executivo apresentou gradientes elevados e fator de segurança próximo ao limite mínimo recomendado, coerente com anomalias observadas em campo. A intervenção da COGERH reduziu significativamente os gradientes hidráulicos e aumentou a segurança da estrutura. Conclui-se que soluções adequadas de impermeabilização e drenagem são essenciais para a segurança de barragens sobre fundações aluvionares espessas.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de terra, Fundação permeável, Percolação, Gradiente hidráulico, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT: This paper evaluates the hydraulic behavior and foundation stability of the Olho d'Água Earth Dam, located in Várzea Alegre, Ceará State, Brazil, considering different seepage control solutions adopted during the design phase and operation. The objective is to compare the hydraulic and geotechnical performance of two design alternatives—the basic design prepared by Aguasolos and the executive design developed by CEC Engenharia—as well as a corrective intervention implemented by COGERH. The methodology was based on two-dimensional numerical modeling of seepage and slope stability using the SEEP/W and SLOPE/W modules of the GeoStudio software, with geotechnical parameters obtained from field and laboratory data. Analyses included flow patterns, exit hydraulic gradients, safety factors against piping, and downstream slope stability under operating conditions. The results showed superior hydraulic performance for the basic design, with lower gradients and higher safety factors. The executive design presented higher gradients and safety factors close to the minimum recommended limit, consistent with anomalies observed in the field. The corrective intervention significantly reduced hydraulic gradients and improved structural safety. It is concluded that adequate impermeabilization and drainage systems are essential for the safety of earth dams founded on thick alluvial deposits.

KEYWORDS: Earth dam, Permeable foundation, Seepage, Hydraulic gradient, Slope stability.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de terra são amplamente utilizadas no armazenamento e na regularização de recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas. Apesar de sua ampla aplicação, a literatura técnica indica que problemas associados à percolação e à erosão interna continuam figurando entre os principais mecanismos de falha dessas estruturas, estando frequentemente relacionados a deficiências de concepção, execução ou alterações inadequadas de projeto. Organismos internacionais de referência destacam que o controle da percolação deve

ser tratado como um sistema integrado, no qual dispositivos de vedação e drenagem atuam de forma complementar para reduzir gradientes hidráulicos e limitar processos de piping (ICOLD, 2017; FEMA, 2015). Estudos recentes reforçam que modificações introduzidas entre o projeto básico e o projeto executivo, quando não acompanhadas de reavaliações hidráulicas e geotécnicas consistentes, podem comprometer significativamente o desempenho da barragem. Alterações no arranjo de tapetes impermeáveis, filtros e sistemas de drenagem interna modificam o regime de fluxo na fundação, podendo elevar gradientes hidráulicos críticos e reduzir as margens de segurança da estrutura (Fell et al., 2014; USBR, 2019).

Nesse contexto, insere-se a Barragem Olho d'Água, localizada em Várzea Alegre–CE, implantada sobre uma fundação aluvionar espessa e heterogênea, com camada de aluvião atingindo aproximadamente 10,8 m de profundidade. O projeto básico da barragem previa um arranjo robusto de controle de percolação, com a adoção de tapete impermeável a montante, filtros e dispositivos de drenagem, visando alongar o caminho de percolação e reduzir gradientes hidráulicos de saída. Entretanto, durante a elaboração do projeto executivo, foram introduzidas alterações significativas na concepção hidráulica originalmente proposta, resultando em uma configuração distinta daquela prevista no projeto básico, sem que constem reavaliações hidráulicas e geotécnicas compatíveis com a magnitude dessas mudanças.

Os efeitos dessas modificações tornaram-se evidentes nos primeiros anos de operação da barragem, com o registro de manifestações associadas à percolação e a necessidade de intervenções corretivas, incluindo a execução de trincheiras de drenagem, a implantação de poços de alívio e a instalação de instrumentação geotécnica para monitoramento do comportamento hidráulico da estrutura, conforme documentado por Fontenelle et al. (2007). Essas intervenções são ilustradas na Figura 1, evidenciando a magnitude das ações necessárias para o controle do comportamento hidráulico da estrutura após sua entrada em operação.



(a) (b)

Figura 1. Intervenções executadas a jusante da Barragem Olho d'Água em 2006, incluindo trincheira de drenagem (a), poços de alívio e piezômetros (b) (Fontenelle *et al*., 2007).

Mesmo após a realização dessas intervenções, a barragem permanece, até o Relatório Anual de Segurança de Barragens de 2024, classificada pelo órgão gestor, a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), entre as estruturas com nível máximo de priorização, em função do desempenho observado e das anomalias registradas ao longo de sua operação.

Trabalhos anteriores, como o estudo desenvolvido por Cavalcante (2021), realizaram avaliações comparativas entre o projeto básico e o projeto executivo da Barragem Olho d'Água por meio de modelagem numérica, considerando, contudo, uma representação simplificada da fundação como um solo único e análises baseadas na mecânica dos solos saturados. O presente trabalho diferencia-se ao adotar uma abordagem mais refinada, incorporando uma estratigrafia detalhada da fundação e a consideração do comportamento de solos não saturados nas análises de fluxo e estabilidade, permitindo uma representação mais realista do regime de percolação e das margens de segurança da barragem.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo realizar uma avaliação comparativa entre o projeto básico e o projeto executivo da Barragem Olho d'Água, empregando modelagens numéricas de fluxo e estabilidade

mais representativas das condições reais da obra, discutindo de forma objetiva os impactos das alterações de projeto sobre o desempenho hidráulico e a segurança da estrutura.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Alternativas de Projeto Avaliadas

A avaliação hidráulica e de estabilidade da Barragem Olho d'Água foi conduzida a partir da comparação entre duas concepções distintas de projeto adotadas ao longo de sua fase de implantação: (i) o projeto básico, desenvolvido pela empresa AGUASOLOS Consultoria de Engenharia, e (ii) o projeto executivo efetivamente construído, elaborado pela CEC Engenharia, aqui tratado como configuração *as built*. As duas alternativas diferem substancialmente quanto à concepção dos dispositivos de controle de percolação na fundação, influenciando diretamente o regime de fluxo subterrâneo, os gradientes hidráulicos desenvolvidos e, por consequência, a segurança hidráulica e geotécnica da estrutura.

A Figura 2 apresenta a seção típica correspondente ao projeto básico, enquanto a Figura 3 ilustra a seção representativa do projeto executado (*as built*), adotada como base para as análises comparativas realizadas neste estudo.

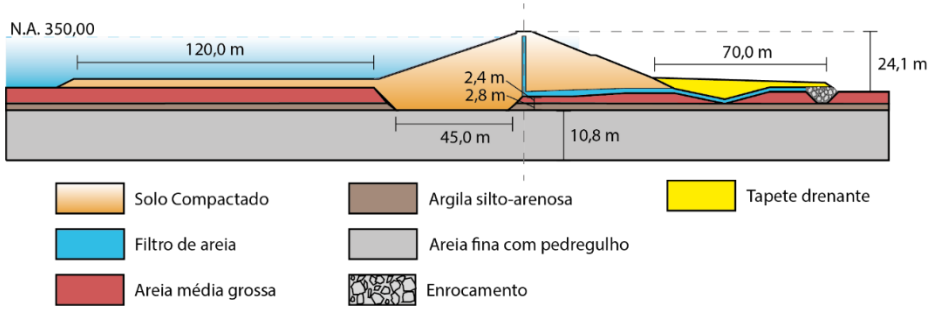


Figura 2. Seção típica da Barragem Olho d'Água – projeto básico da AGUASOLOS, com tapete impermeável a montante, filtro vertical e tapete drenante a jusante.

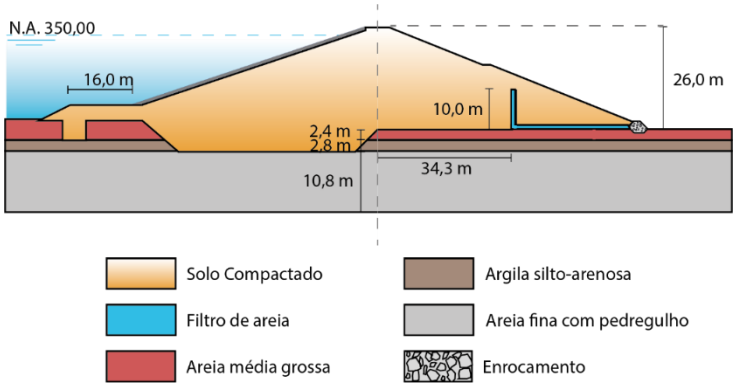


Figura 3. Seção típica da Barragem Olho d'Água – projeto executivo (as built) da CEC Engenharia, sem sem tapetes impermeáveis e drenantes, com filtro vertical deslocado para jusante.

2.1.1 Projeto Básico – AGUASOLOS

O projeto básico da Barragem Olho d'Água foi concebido a partir de uma abordagem conservadora de controle de percolação, adequada às condições geotécnicas locais, caracterizadas por fundação aluvionar espessa e predominantemente permeável. A solução adotada combina diferentes dispositivos clássicos de vedação e drenagem, com o objetivo de alongar o caminho de percolação, reduzir gradientes hidráulicos de saída e dissipar subpressões na região de jusante.

Conforme ilustrado na Figura 2, o projeto previu a implantação de um tapete impermeável a montante, executado com material argiloso compactado, cuja principal função é aumentar significativamente o comprimento do percurso hidráulico sob a barragem. Esse dispositivo atua promovendo maior perda de carga ao longo do fluxo subterrâneo, reduzindo as velocidades de percolação e mitigando o risco de erosão interna na fundação.

A jusante do eixo da barragem, foi projetado um tapete drenante extenso, constituído por material granular com elevada permeabilidade, destinado a captar e conduzir de forma controlada o fluxo percolante que atravessa a fundação. Além de sua função drenante, esse tapete exerce papel relevante na redução dos gradientes hidráulicos de saída e no controle das pressões neutras junto ao pé do talude de jusante.

Complementarmente, o projeto básico contempla a presença de um filtro vertical do tipo chaminé, posicionado na região central do maciço, com a finalidade de interceptar fluxos ascendentes e garantir a integridade do aterro em eventuais situações de fissuração ou heterogeneidades construtivas. Essa configuração resulta em um sistema integrado de vedação e drenagem, típico de barragens implantadas sobre fundações altamente permeáveis.

2.1.2 Projeto Executivo (as built) – CEC Engenharia

O projeto executivo desenvolvido pela CEC Engenharia, posteriormente executado em campo, adotou uma concepção significativamente distinta em relação ao controle de percolação, conforme apresentado na Figura 3. Nessa alternativa, observa-se a redução do tapete impermeável a montante de 120 m para 16m, bem como a eliminação do tapete drenante a jusante, dispositivo originalmente previstos no projeto básico.

A estratégia adotada buscou compensar a redução dos dispositivos de controle hidráulico por meio do reposicionamento do sistema de drenagem, promovendo o deslocamento do filtro vertical em direção à jusante. Essa alteração buscou induzir trajetórias de fluxo mais longas sob o maciço, compensando, de forma indireta, a retirada dos tapetes impermeável e drenante.

2.2 Características Geotécnicas dos Materiais

A definição das características geotécnicas dos materiais constituintes do maciço e da fundação da Barragem Olho d'Água foi realizada a partir de uma análise integrada das informações disponíveis em projeto e dos resultados de investigações geotécnicas executadas ao longo das fases de concepção e implantação da obra. Foram utilizados como base o projeto básico e o projeto executivo da barragem, disponíveis na Biblioteca Virtual da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH), bem como os relatórios de sondagens e os ensaios de laboratório realizados nos materiais de empréstimo definidos em projeto.

Os parâmetros geotécnicos adotados refletem, portanto, uma combinação de dados experimentais obtidos em laboratório, informações de campo provenientes das investigações geotécnicas da fundação e valores consolidados nos documentos técnicos do empreendimento. Essa abordagem buscou garantir representatividade dos materiais efetivamente empregados na construção da barragem, ao mesmo tempo em que assegurou coerência entre as propriedades mecânicas e hidráulicas utilizadas nas análises numéricas subsequentes.

Para os materiais constituintes do maciço, incluindo núcleo, enrocamentos de proteção, filtros e tapetes drenantes, foram considerados os resultados de ensaios de caracterização física, compactação e resistência ao cisalhamento, permitindo a definição do peso específico, da coesão efetiva e do ângulo de atrito efetivo. No caso dos materiais granulares empregados em filtros e drenagens, os parâmetros de resistência foram definidos de forma compatível com seu comportamento predominantemente friccional.

A caracterização hidráulica dos materiais foi realizada a partir da definição dos coeficientes de permeabilidade, obtidos por meio de ensaios laboratoriais e complementados por valores de referência usuais para materiais de granulometria semelhante. Para o maciço compactado, considerou-se ainda a anisotropia hidráulica, representada pela razão entre as permeabilidades horizontal e vertical, de modo a reproduzir o efeito do processo construtivo em camadas sucessivas.

Os parâmetros geotécnicos e hidráulicos definidos para cada material encontram-se sintetizados na Tabela 1, a qual reúne os valores de peso específico, coesão, ângulo de atrito, parâmetro φ_β, coeficiente de permeabilidade e anisotropia hidráulica adotados nas simulações numéricas de fluxo e estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos e hidráulicos dos materiais da Barragem Olho d'Água.

Zona/Material	Peso Especif. (kN/m³)	Coesão Efetiva (kPa)	Ângulo de atrito (°)	ϕ_b (°)	Permeabilidade - Kx (m/s)	Anisotropia (ky/kx)
Maciço Compactado	20,2	35	29,4	14	$5{,}4 \times 10^{-8}$	0,1
Filtro de Areia	19,0	0	30	0	$1{,}0 \times 10^{-5}$	1,0
Areia média grossa (fundação)	19,5	0	32	0	$5{,}6 \times 10^{-6}$	1,0
Argila silto arenosa (fundação)	20,0	20	25	0	$1{,}0 \times 10^{-8}$	1,0
Areia fina com pedregulho (fundação)	21,0	0	32	0	$2{,}8 \times 10^{-6}$	1,0
Tapete drenante a jusante	20,0	0	32	0	$5{,}6 \times 10^{-6}$	1,0
Enrocamento	21,0	0	40	0	$1{,}0 \times 10^{-3}$	1,0

2.3 Modelagens Numéricas de Fluxo e Estabilidade

As análises numéricas de fluxo e estabilidade da Barragem Olho d'Água foram realizadas por meio do software GeoStudio 2025, desenvolvido pela Geo-Slope International Ltd., amplamente utilizado em estudos geotécnicos de barragens de terra. As modelagens foram conduzidas de forma integrada, de modo que os resultados da análise de fluxo subsidiaram diretamente as análises de estabilidade dos taludes.

2.3.1 Modelagem do Fluxo Subterrâneo

A análise do fluxo subterrâneo foi realizada utilizando o módulo SEEP/W, considerando regime permanente e condições representativas do nível máximo operacional do reservatório, correspondente à cota 350 m. As simulações foram desenvolvidas para as duas alternativas de projeto avaliadas — projeto básico e projeto executivo (as built) — adotando-se as mesmas condições de contorno hidráulicas, variando-se exclusivamente a geometria e a configuração interna dos dispositivos de controle de percolação definidos em cada projeto.

O domínio foi discretizado por meio do método dos elementos finitos, utilizando uma malha bidimensional com tamanho global dos elementos de 0,50 m, valor adotado de forma a garantir adequada representação dos gradientes hidráulicos e das linhas de fluxo, especialmente nas regiões próximas ao pé do talude de jusante e aos dispositivos de drenagem. As propriedades hidráulicas dos materiais foram definidas conforme apresentado no item 2.2, incluindo a consideração da anisotropia hidráulica no maciço compactado.

2.3.2 Análise de Estabilidade dos Taludes

As análises de estabilidade foram realizadas com base nos resultados da modelagem de fluxo em regime permanente, utilizando o módulo SLOPE/W. As avaliações concentraram-se no talude de jusante, por se tratar da condição mais crítica do ponto de vista da segurança global da barragem, especialmente em cenários associados à percolação na fundação.

O método de equilíbrio limite adotado foi o de Morgenstern–Price, que satisfaz simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos, sendo amplamente recomendado para análises de estabilidade de barragens de terra. A busca pela superfície crítica de ruptura foi conduzida por meio do método de entrada e saída, com posterior otimização automática da superfície de deslizamento utilizando o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO), visando a identificação da superfície associada ao menor fator de segurança.

Assim como na análise de fluxo, as duas alternativas de projeto foram avaliadas sob condições de contorno idênticas, sendo as diferenças observadas nos resultados exclusivamente atribuídas às distintas configurações geométricas e aos arranjos internos de controle de percolação adotados em cada projeto.

3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO HIDRÁULICO E DA ESTABILIDADE

As análises numéricas de fluxo permitiram avaliar de forma comparativa o desempenho hidráulico das duas concepções de projeto adotadas para a Barragem Olho d'Água, evidenciando diferenças significativas no regime de percolação, na dissipação de pressões neutras e na eficiência global dos dispositivos de controle hidráulico. Os resultados obtidos são discutidos a seguir.

3.1 Comparação do comportamento hidráulico entre as alternativas de projeto

A avaliação do comportamento hidráulico das alternativas de projeto foi realizada a partir da análise da distribuição das poropressões e da posição da linha freática no maciço e na fundação da barragem, elementos fundamentais para a compreensão do regime de percolação e de seus efeitos sobre a segurança hidráulica.

A Figura 4 apresenta os resultados da análise de fluxo da barragem para o projeto básico desenvolvido pela AGUASOLOS, destacando a distribuição das poropressões e a linha freática de saturação. Observa-se um regime de percolação bem distribuído, com dissipação gradual das cargas hidráulicas, coerente com a presença do tapete impermeável a montante e do tapete drenante a jusante.

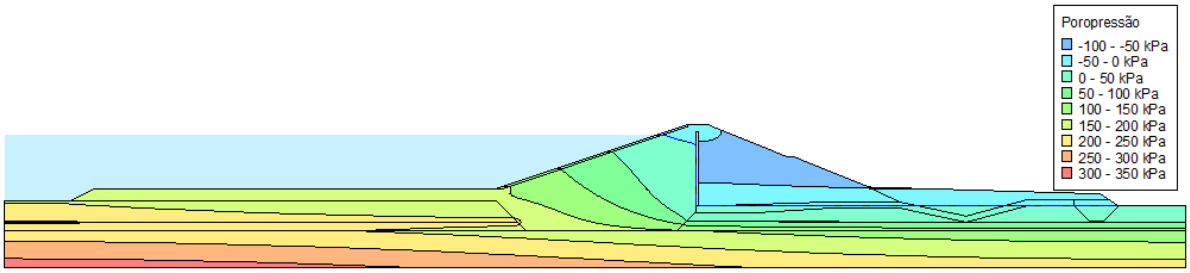


Figura 4. Análise de fluxo da Barragem Olho d'Água – projeto básico da AGUASOLOS: linha freática e distribuição das poropressões

Os resultados numéricos indicaram, para essa alternativa, uma vazão total da ordem de $3{,}8\times10^{-6}$ m³/s por metro linear de barragem, associada a gradientes hidráulicos médios na saída inferiores a 0,02, caracterizando velocidades de percolação muito baixas e um regime hidráulico claramente dissipativo. Esse comportamento é compatível com práticas consagradas de projeto para barragens implantadas sobre fundações permeáveis, nas quais o controle das pressões neutras e dos gradientes de saída constitui elemento central para a mitigação de processos de erosão interna.

Em contraste, a Figura 5 apresenta o resultado da análise de fluxo do projeto executivo as built da CEC Engenharia, também com a representação das pressões neutras e da linha freática de saturação. Nessa configuração, a supressão dos tapetes impermeável a montante e drenante a jusante, associada ao reposicionamento dos elementos internos de drenagem, alterou de forma significativa o regime de percolação na fundação. Observa-se maior concentração de linhas de fluxo, elevação da linha freática e intensificação das pressões neutras nas proximidades da zona de saída.

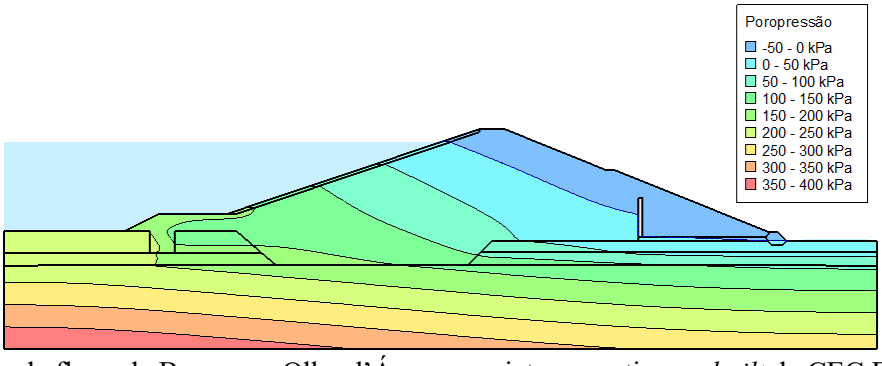


Figura 5. Análise de fluxo da Barragem Olho d'Água – projeto executivo *as built* da CEC Engenharia: linha freática e distribuição das poropressões.

Do ponto de vista quantitativo, essa concepção resultou em uma vazão total de aproximadamente $9{,}7\times10^{-6}$ m³/s, valor cerca de 2,5 a 3 vezes superior ao obtido na alternativa do projeto básico. De forma coerente, os gradientes hidráulicos médios na saída também apresentaram aumento expressivo, atingindo valores da ordem de $i \approx 0{,}10$, significativamente superiores aos observados na solução original. Tal incremento indica aumento relevante das velocidades de percolação e redução da eficiência do sistema de dissipação hidráulica.

3.2 Análise da estabilidade associada ao regime de fluxo

A avaliação da estabilidade dos taludes foi conduzida de forma integrada aos resultados da análise de fluxo, considerando a influência do regime de percolação e das poropressões sobre o comportamento mecânico da barragem em condição de operação. Os estudos permitiram comparar o desempenho das duas alternativas de projeto sob o ponto de vista da segurança global da estrutura.

A Figura 6 apresenta o resultado da análise de estabilidade do projeto básico da AGUASOLOS, para o qual foi obtido um fator de segurança global da ordem de FS ≈ 2,55, caracterizando uma condição amplamente estável. Esse resultado é coerente com o regime hidráulico mais dissipativo observado nessa alternativa, marcado por baixas vazões percolantes e gradientes hidráulicos reduzidos na região de saída.

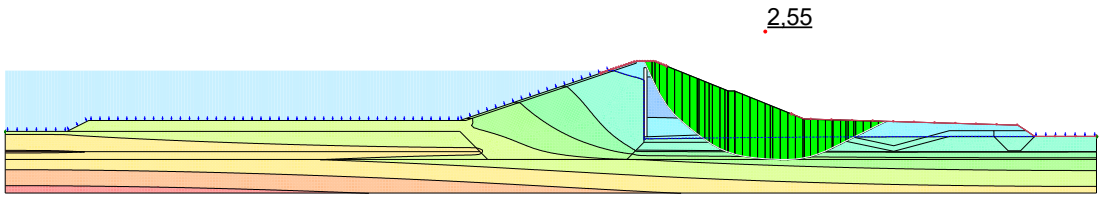


Figura 6. Estudo de estabilidade do talude em regime de operação – projeto básico da AGUASOLOS.

Em contraste, a Figura 7 ilustra o estudo de estabilidade referente ao projeto executivo as built da CEC Engenharia, no qual o fator de segurança global foi reduzido para cerca de FS ≈ 1,71. Embora ainda superior ao valor mínimo usualmente adotado para condições operacionais, esse resultado evidencia uma redução significativa da margem de segurança, compatível com o aumento da vazão percolante e dos gradientes hidráulicos observados na análise de fluxo.

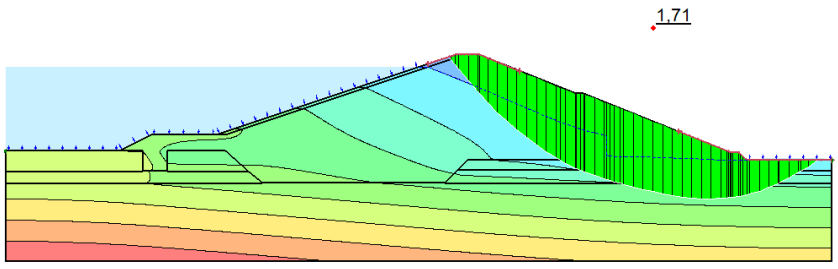


Figura 7. Estudo de estabilidade do talude em regime de operação – projeto executivo *as built* da CEC Engenharia.

Os resultados confirmam que as alterações introduzidas na concepção do sistema de controle de percolação influenciaram diretamente o comportamento hidráulico da fundação e refletiram-se de forma clara na estabilidade global da barragem, reforçando a importância da integração entre os estudos de fluxo e de estabilidade em projetos desse tipo.

4. CONCLUSÕES

A partir das análises numéricas de fluxo e estabilidade realizadas, foi possível avaliar de forma consistente o desempenho hidráulico e estrutural das duas alternativas de projeto consideradas para a Barragem

Olho d'Água. Os resultados obtidos evidenciam diferenças marcantes entre o projeto básico e o projeto executivo efetivamente implementado, sobretudo no que se refere ao controle da percolação pela fundação. Verificou-se numericamente que a alternativa adotada no projeto executivo apresentou um comportamento hidráulico menos eficiente, caracterizado por um aumento significativo das vazões percolantes pela fundação quando comparada à solução original. Esse incremento foi acompanhado por elevação expressiva dos gradientes hidráulicos na região de saída, indicando maior concentração de fluxo em contraste com o regime mais dissipativo observado no projeto básico.

Do ponto de vista da estabilidade, a modificação da concepção original, em especial o reposicionamento do filtro vertical para jusante, contribuiu para a elevação do nível de saturação em parcela significativa do talude de jusante. Embora o fator de segurança global obtido para essa alternativa ainda permaneça acima do valor mínimo admissível para a condição de operação, observa-se uma redução clara da margem de segurança, coerente com o regime hidráulico mais desfavorável imposto à estrutura.

Nesse contexto, ressalta-se que a avaliação da segurança da barragem não deve se restringir exclusivamente ao atendimento dos critérios mínimos de estabilidade do talude. As vazões percolantes elevadas e os gradientes hidráulicos intensificados na saída, quando analisados de forma integrada, indicam comprometimento da segurança sob o ponto de vista hidráulico, aumentando a suscetibilidade a anomalias associadas à percolação e à erosão interna.

Os resultados numéricos obtidos corroboram, portanto, as dificuldades operacionais e as inúmeras intervenções realizadas ao longo dos últimos anos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, reforçando a compatibilidade entre o comportamento observado em campo e as previsões do modelo. Dessa forma, conclui-se que a alternativa executada contribuiu para a deterioração do desempenho hidráulico da barragem, justificando sua inclusão entre as estruturas do Estado do Ceará com nível máximo de priorização, em função da recorrência de anomalias e da necessidade contínua de ações corretivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cavalcante, G.O. (2021) *Análise de fluxo e estabilidade na fundação da Barragem Olho d'Água: comparação entre alternativas de projeto*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Cedergren, H.R. (1989) *Seepage, drainage, and flow nets.* 3rd ed., John Wiley & Sons, New York , USA.

Fell, R., Foster, M., Spannagle, M. (1998) *Analysis of embankment dam incidents.* UNICIV Report No. R-374, University of New South Wales, Sydney.

Federal Emergency Management Agency (2015) *Federal guidelines for dam safety: risk management.* Washington, DC.

Fontenelle, A.S., Cavalcante, S.P.P., Sales, C.A.T. (2007) *Relatório Anual de Segurança de Barragens – Riscos e Inspeções – 2006. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH*, Gerência de Segurança e Infraestrutura (GESIN), Fortaleza, CE, Brasil.

International Commission on Large Dams (2017) *Bulletin on dam safety: risk assessment in dam safety management.* ICOLD, Paris.

United States Bureau of Reclamation (2019) *Design standards No. 13 – embankment dams.* USBR, Denver.