DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/43

Estudo do Efeito de Arqueamento em uma Barragem de Terra-enrocamento Utilizando Modelagem Numérica Hidromecânica Acoplada em Solos Não Saturados

Hosana Emilia Sarmento Costa Leite
Professora Dra., IFPE, Recife, Brasil, hosanasarmento@recife.ifpe.edu.br

Lícia Mouta da Costa
Professora Dra., UFPE, Recife, Brasil, licia.costa@ufpe.br

Leonardo José Nascimento Guimarães
Professor Dr., UFPE, Recife, Brasil, leonardo.guimaraes@ufpe.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior
Professor Dr., UFRN, Natal, Brasil, olavo.santos@ufrn.br

Silvio Romero de Melo Ferreira
Professor Dr., UFPE, Recife, Brasil, silvio.mferreira@ufpe.br

RESUMO: O Brasil ocupa posição de destaque mundial na construção de barragens e na geração de energia hidrelétrica. Essas estruturas envolvem riscos significativos, reforçando a necessidade de aprimorar as metodologias de avaliação de segurança. Entre os fenômenos que influenciam o comportamento estrutural de barragens de terra-enrocamento destaca-se o efeito de arqueamento. Este trabalho avalia sua ocorrência e intensidade em uma barragem de terra-enrocamento de uma usina hidrelétrica no semiárido brasileiro. A análise foi conduzida por modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos, com formulação hidromecânica acoplada para meios porosos não saturados. Os materiais foram representados por modelo elástico linear (enrocamentos, transições e filtros) e pelo Modelo Básico de Barcelona (BBM) para o núcleo compactado. As simulações foram realizadas com o programa CODE_BRIGHT. Os resultados evidenciaram o arqueamento, com redução das tensões verticais no núcleo e cerca de 46% de redistribuição das tensões para zonas adjacentes mais rígidas. Os resultados confirmam a influência das diferenças de rigidez entre os materiais na redistribuição das tensões internas e indicam que a modelagem hidromecânica acoplada é uma ferramenta eficaz para analisar barragens de terra-enrocamento sob condições não saturadas.

PALAVRAS-CHAVE: acoplamento hidromecânico, arqueamento, barragens de terra-enrocamento, modelagem numérica.

ABSTRACT: Brazil holds a prominent global position in dam construction and hydropower generation. These structures involve significant risks, reinforcing the need to improve safety assessment methodologies. Among the phenomena influencing the structural behavior of earth-rockfill dams, the arching effect stands out. This study evaluates its occurrence and intensity in an earth-rockfill dam of a hydropower plant located in a semi-arid region of Brazil. The analysis was performed through numerical modeling using the finite element method with a coupled hydromechanical formulation for unsaturated porous media. Material behavior was represented by a linear elastic model for rockfill, transition and filter zones, and by Barcelona Basic Model (BBM) for the compacted core. Simulations were carried out using CODE_BRIGHT program. The results showed the arching effect, with a significant reduction in vertical stresses in the core and approximately 46% stress redistribution to adjacent stiffer zones. These findings confirm the influence of stiffness differences on stress redistribution and indicate that coupled hydromechanical modeling is effective for analyzing earth-rockfill dams under unsaturated conditions.

KEYWORDS: arching effect; earth-rockfill dams; numerical modeling; hydromechanical coupling.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa posição de destaque mundial na construção de barragens e na geração de energia hidrelétrica, consolidando-se como um dos maiores produtores globais desse tipo de energia (Global Energy Monitor, 2024). Apesar de sua importância para o desenvolvimento energético e econômico, barragens envolvem riscos significativos, podendo gerar impactos sociais, ambientais e econômicos em casos de falha ou ruptura. No país, são registrados anualmente incidentes envolvendo barragens, indicando a necessidade de aprimoramento contínuo das metodologias de avaliação de segurança (ANA, 2025).

Entre os fenômenos que influenciam o comportamento estrutural de barragens de terra-enrocamento destaca-se o efeito de arqueamento, caracterizado pela redistribuição das tensões internas em função das diferenças de deformabilidade entre os materiais que compõem o maciço. Em geral, o núcleo impermeável, constituído por material mais compressível, tende a sofrer maiores deformações, promovendo a transferência de parte das tensões verticais para os materiais adjacentes mais rígidos, como filtros, transições e enrocamentos. Esse processo resulta em redução das tensões no núcleo e concentração de tensões nas zonas laterais do maciço. Esse comportamento pode ter implicações relevantes para a segurança da barragem. O alívio de tensões no núcleo pode favorecer a formação de fissuras orientadas na direção do fluxo de água, comprometendo a estanqueidade do maciço e podendo facilitar processos de erosão interna. Em situações mais críticas, a redução das tensões efetivas pode favorecer a ocorrência de fraturamento hidráulico quando a pressão da água supera a tensão total atuante no solo (Pereira, 1986).

Diversos estudos investigaram os fatores que influenciam o arqueamento em barragens. Law (1975) demonstrou, por meio de análises por elementos finitos, que a rigidez relativa entre núcleo e espaldares exerce influência direta na redistribuição de tensões e recalques do maciço. Orgler (1983) observou que a geometria do núcleo também afeta a intensidade do fenômeno, indicando que núcleos verticais tendem a apresentar arqueamento mais pronunciado. Estudos paramétricos realizados por Carvalho (2018) reforçam que a diferença entre os módulos de deformabilidade dos materiais é um dos principais fatores que governam a magnitude desse efeito.

Nesse contexto, a modelagem numérica tem se consolidado como uma ferramenta importante para a análise do comportamento de barragens, permitindo investigar a evolução do estado de tensões e deformações ao longo das fases de construção e operação. Formulações hidromecânicas acopladas para meios porosos não saturados possibilitam representar de forma mais realista as interações entre processos hidráulicos e mecânicos no interior do maciço. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é avaliar a ocorrência e a intensidade do efeito de arqueamento em uma barragem de terra-enrocamento pertencente a um aproveitamento hidrelétrico no semiárido brasileiro, por meio de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos com formulação hidromecânica acoplada.

2 METODOLOGIA

2.1 Seção analisada e abordagem numérica

A simulação numérica foi realizada em uma seção transversal representativa de uma barragem terra–enrocamento com núcleo impermeável, pertencente a um aproveitamento hidrelétrico no semiárido brasileiro (Figura 1). A seção selecionada possui altura aproximada de 73 m e contempla o zoneamento completo do maciço, incluindo fundação rochosa e ensecadeira incorporada. A análise do comportamento tensão–deformação foi conduzida por Método dos Elementos Finitos (MEF) em regime bidimensional de deformação plana. As simulações foram executadas no código CODE_BRIGHT (programa *in house*), utilizando o GiD como pré/pós-processador para definição da geometria, geração de malha e interpretação dos resultados.

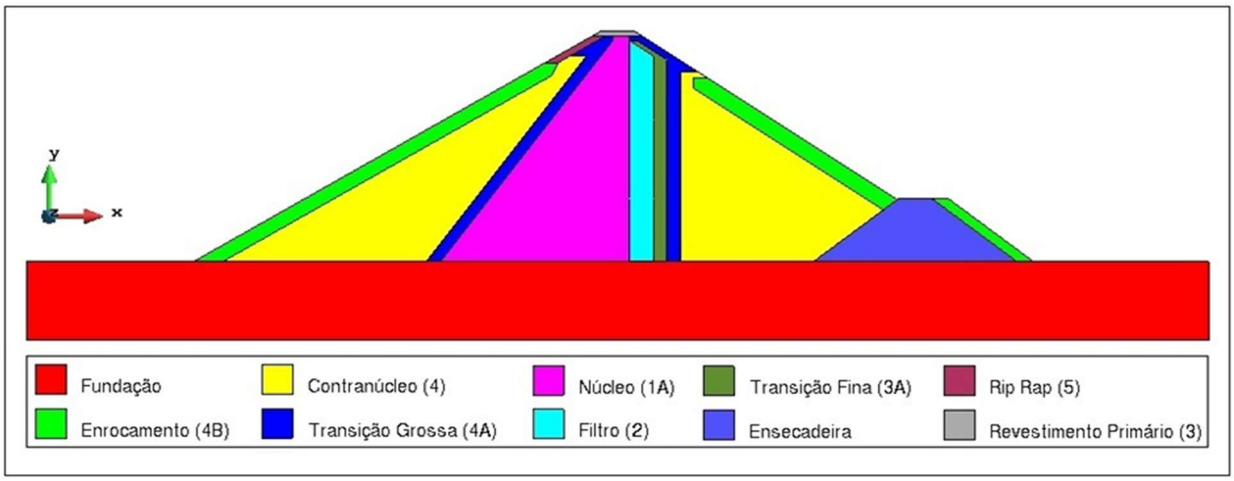


Figura 1. Materiais componentes da barragem na seção de estudo (A Autora, 2025).

2.2 Modelos constitutivos e representação hidromecânica

O comportamento mecânico do núcleo compactado foi representado pelo Modelo Básico de Barcelona (BBM) proposto por Alonso *et al*. (1990), apropriado para meios porosos não saturados. Os demais materiais (enrocamentos, transições e filtros) foram modelados por elasticidade linear, estratégia amplamente empregada em análises de barragens de enrocamento quando a construção por etapas é considerada e as zonas plastificadas não são predominantes (Veiga Pinto, 1983; Cruz, 2004; Souza, 2008).

A descrição hidráulica dos materiais foi feita por meio das curvas de retenção de água, representadas pela formulação de van Genuchten (1980), e por parâmetros de permeabilidade intrínseca. Não havendo ensaios específicos de sucção/curva de retenção para todos os materiais, curvas típicas compatíveis foram estimadas a partir da literatura, assegurando consistência com a natureza granulométrica e o comportamento esperado dos materiais.

2.3 Parâmetros e calibração

Os parâmetros apresentados na Tabela 1 correspondem ao material do núcleo compactado e foram obtidos a partir da interpretação de ensaios edométricos e triaxiais realizados em amostras compactadas nas condições de projeto. Os valores foram posteriormente ajustados por meio de retroanálises, visando reproduzir adequadamente o comportamento tensão-deformação observado para o material estudado. Os parâmetros dos materiais granulares foram definidos a partir de ensaios disponíveis, critérios de projeto e referências da literatura técnica, dispostos na Tabela 2.

Tabela 1 - Parâmetros constitutivos do BBM adotados

$\lambda(0)$	κ_0	p_0^* (MPa)	p^c (MPa)	r	β (MPa^{-1})	M	*k*	α
0,053	0,009	0,28	0,01	0,85	3,0	1,0	1,0	0,43

Tabela 2 - Parâmetros de entrada mecânicos dos enrocamentos

ZONA	MATERIAL	E (MPa)	υ	ϕ (º)
Transição Grossa (4A)	Enrocamento Fino (Ømáx. = 0,30m)	98,07	0,29	38
Contranúcleo (4)	Enrocamento (Ømáx. = 0,80m)	98,07	0,27	40
Enrocamento (4B)	Enrocamento (inclusive, Ø > 0,80m)	98,07	0,27	40
Rip-rap (5)	Enrocamento Selecionado (Ø50 = 0,60m)	98,07	0,27	40
Zona 2	Transição Fina - Filtro: Areia siltosa	59,03	0,28	33
Zona 3A*	Transição Fina: Cascalho arenoso lavado	90,00	0,13	36

2.4 Discretização do domínio e malha de elementos finitos

O domínio foi discretizado em uma malha bidimensional composta por elementos triangulares lineares, totalizando aproximadamente 3.466 nós e 6.618 elementos (Figura 2). O zoneamento da seção foi preservado conforme o projeto, com simplificação do contato maciço–fundação. A construção foi simulada em 15 etapas, enquanto o enchimento do reservatório foi representado por incrementos sucessivos do nível d'água (E1–E10).

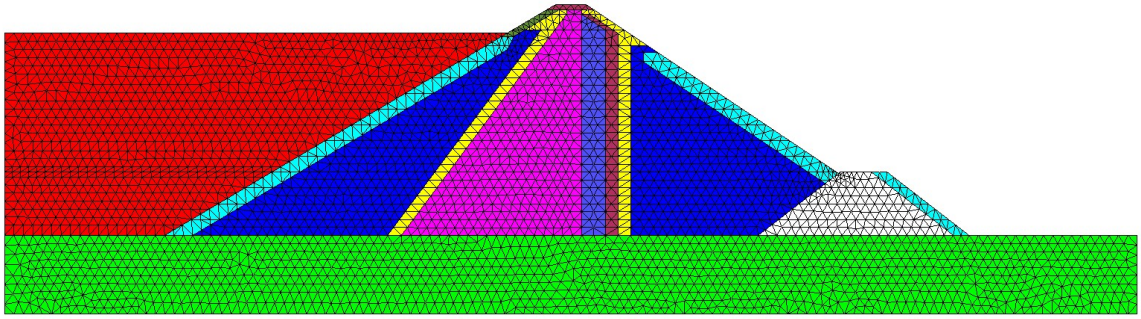


Figura 2. Malha de elementos finitos adotada para análise da seção de estudo (A Autora, 2025).

2.5 Condições iniciais e de contorno

Foram impostas restrições de deslocamento na base da fundação e restrição horizontal nos contornos laterais. No problema hidráulico, adotaram-se contornos impermeáveis nas fronteiras laterais e inferior. O estado inicial foi definido por tensões geostáticas e pressão hidrostática, sendo atribuídos valores iniciais de porosidade, sucção e tensões para garantir a estabilidade numérica. A ação do reservatório foi representada por pressões hidrostáticas aplicadas progressivamente no talude de montante.

2.6 Simulação por fases: construção e enchimento

A construção foi simulada por ativação incremental de camadas no CODE_BRIGHT, considerando acoplamento hidromecânico e dissipação das poropressões. O enchimento do reservatório foi representado por etapas sucessivas de carregamento hidráulico transiente até atingir condição permanente em cada nível (Figura 3). Esse procedimento foi adotado devido ao fato do enchimento ocorrer simultaneamente à fase de construção. Por fim, o efeito de arqueamento foi avaliado por meio da redistribuição de tensões no maciço, analisando-se perfis e mapas de tensões em etapas representativas da construção e do enchimento do reservatório.

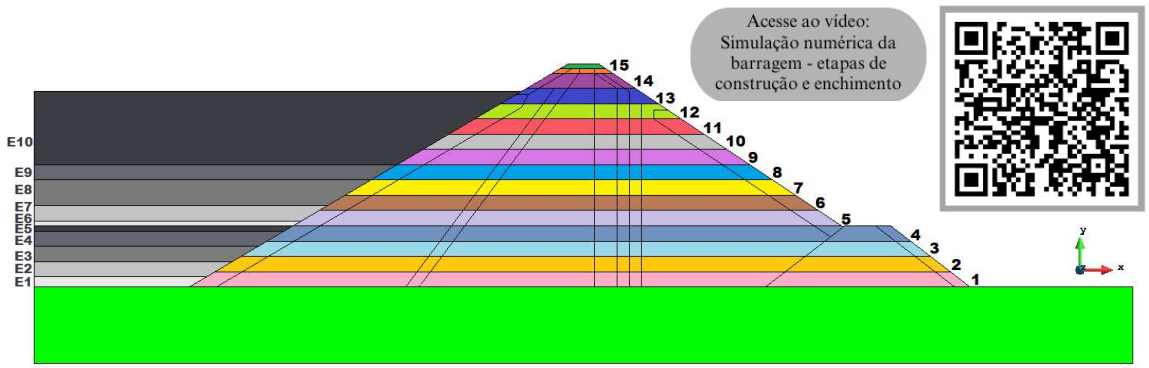


Figura 3. Camadas componentes da barragem na seção de estudo e etapas de construção e enchimento (A Autora, 2025).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da modelagem numérica da barragem, com foco na evolução do campo de tensões durante as fases de construção e enchimento do reservatório e na identificação do fenômeno de arqueamento no interior do maciço.

A análise apresentada neste estudo refere-se ao período compreendido entre o início da construção da barragem e a elevação do nível d'água do reservatório até a cota 299,00 m, correspondente ao nível mínimo de operação. Esse intervalo abrange o período de 10 de agosto de 1986 (tempo = 0 dias) a 31 de maio de 1988 (tempo = 660 dias). O término da construção do maciço ocorreu em 18 de fevereiro de 1988, quando a barragem atingiu a cota 307,60 m, correspondente a aproximadamente 557 dias de simulação.

Cabe destacar que, diferentemente do procedimento usual em barragens de terra e enrocamento, no caso analisado o enchimento do reservatório ocorreu concomitantemente ao alteamento do maciço. Dessa forma, a evolução do campo de tensões ao longo da simulação reflete a interação entre os incrementos de peso próprio do aterro e as alterações hidromecânicas associadas à elevação do nível d'água.

3.1 Evolução das tensões durante a construção

A evolução do campo de tensões no maciço foi analisada ao longo das diferentes etapas da simulação numérica, considerando o processo construtivo da barragem e o enchimento do reservatório, que ocorreram de forma concomitante durante a execução da obra. Essa particularidade do empreendimento resulta em um comportamento hidromecânico mais complexo, uma vez que os incrementos de peso próprio do aterro ocorrem simultaneamente à elevação do nível d'água.

A distribuição das tensões verticais totais na seção analisada é apresentada na Figura 4 e na Figura 5, correspondentes, respectivamente, às condições de final da construção e após o enchimento do reservatório até a cota 299,00 m. No CODE_BRIGHT, a convenção adotada considera tensões de compressão com sinal negativo e tensões de tração com sinal positivo.

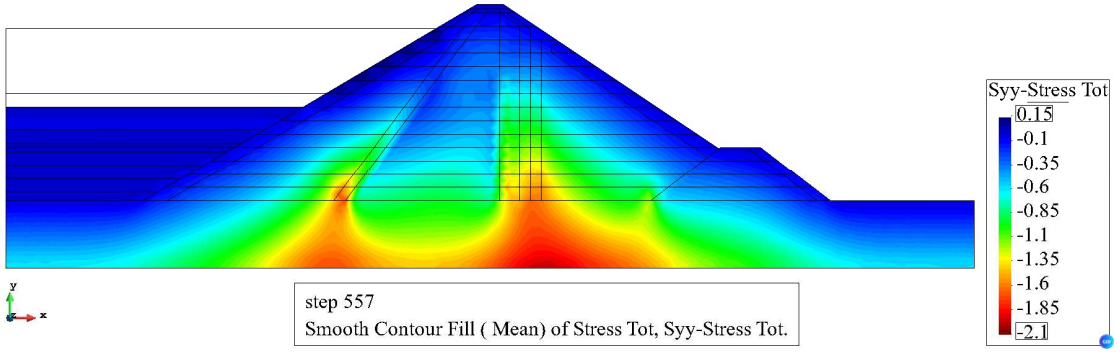


Figura 4. Distribuição das tensões verticais totais (MPa) na seção de estudo para o final da construção (A Autora, 2025).

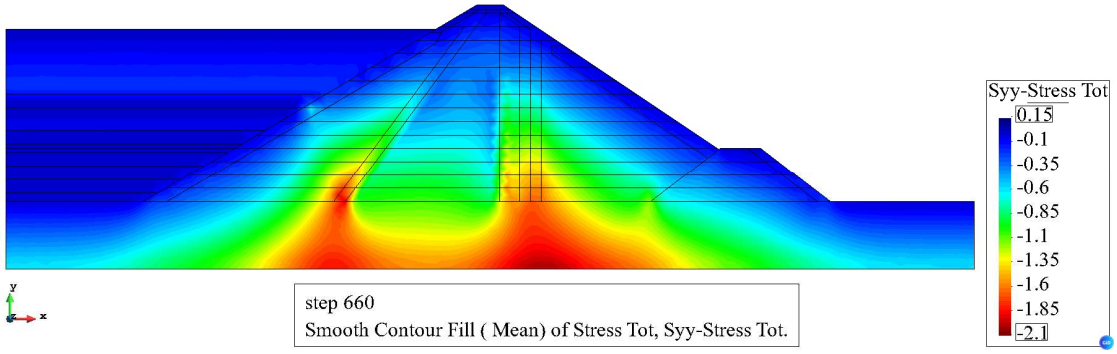


Figura 5. Distribuição das tensões verticais totais (MPa) na seção de estudo após o enchimento até a cota 299,00 m. (A Autora, 2025).

Observa-se que o aumento progressivo das camadas de aterro promove o incremento das tensões verticais no interior do maciço, principalmente nas regiões mais profundas da barragem e na fundação. Paralelamente, a elevação do nível do reservatório altera as condições hidráulicas da estrutura, influenciando o estado de tensões e pressões internas, especialmente nas regiões próximas ao talude de montante.

A interação entre os processos de alteamento do maciço e variação das condições hidráulicas resulta em ajustes contínuos na redistribuição das tensões ao longo do tempo. Como consequência, o comportamento estrutural da barragem passa a ser governado não apenas pelo peso próprio da estrutura, mas também pelas alterações hidromecânicas associadas ao enchimento do reservatório.

Observa-se que as diferenças de rigidez entre os materiais que compõem o barramento desempenham papel fundamental na redistribuição das tensões internas. O núcleo, constituído por material mais deformável, tende a sofrer maiores deformações sob a ação das cargas aplicadas, enquanto os enrocamentos e materiais de transição, mais rígidos, absorvem parcela significativa dessas tensões, como pode ser observado nas Figuras 4 e 5. Esse processo de transferência de cargas entre os diferentes materiais do maciço constitui o mecanismo fundamental associado ao desenvolvimento do efeito de arqueamento, analisado com maior detalhe na seção seguinte.

3.2 Avaliação do efeito de arqueamento

Nas Figuras 4 e 5, observa-se, em ambas as condições analisadas, uma redução das tensões verticais na região do núcleo, acompanhada por concentração de tensões nas zonas adjacentes de filtro e transição. Esse comportamento é característico do fenômeno de arqueamento, no qual parte das tensões verticais é transferida do núcleo mais deformável para os materiais laterais mais rígidos que compõem o maciço da barragem. As representações cromáticas das Figuras evidenciam esse padrão de redistribuição de tensões, indicando valores menores no núcleo em comparação com os maciços estabilizadores.

Para quantificar esse comportamento, foi selecionado um elemento localizado na região central do núcleo, na cota 256,67 m (Elemento 1318), conforme ilustrado na Figura 6. Considerando o peso de terra acima desse ponto, a tensão vertical total esperada seria da ordem de 0,98 MPa. Entretanto, o valor obtido na simulação foi de aproximadamente 0,53 MPa, evidenciando um expressivo alívio de tensões sofrido pelo núcleo. Esse resultado corresponde a uma razão entre a tensão vertical simulada e a tensão teórica de aproximadamente 0,54, indicando que cerca de 46% da tensão vertical foi redistribuída para as zonas adjacentes, evidenciando quantitativamente a ocorrência do efeito de arqueamento.

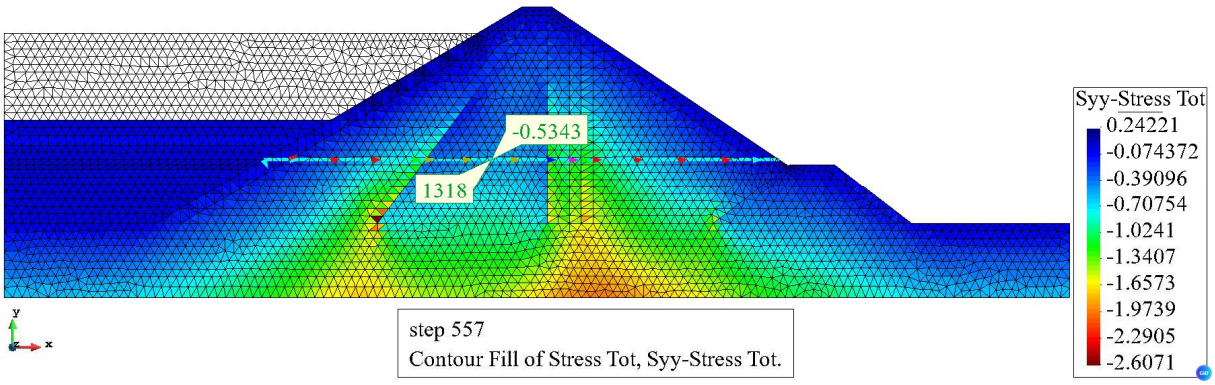


Figura 6. Identificação do elemento 1318 e seu respectivo valor de tensão vertical total (MPa) na seção discretizada do estudo na fase final da construção. (A Autora, 2025).

A Figura 7 apresenta a variação das tensões verticais totais ao longo de uma linha longitudinal na mesma cota. Observa-se que, nas proximidades das zonas de transição e filtro, ocorre redução das tensões no núcleo, seguida de um leve aumento na região central, ainda assim permanecendo inferior aos valores registrados nos maciços laterais. Esse comportamento confirma a redistribuição de cargas para os materiais mais rígidos da estrutura.

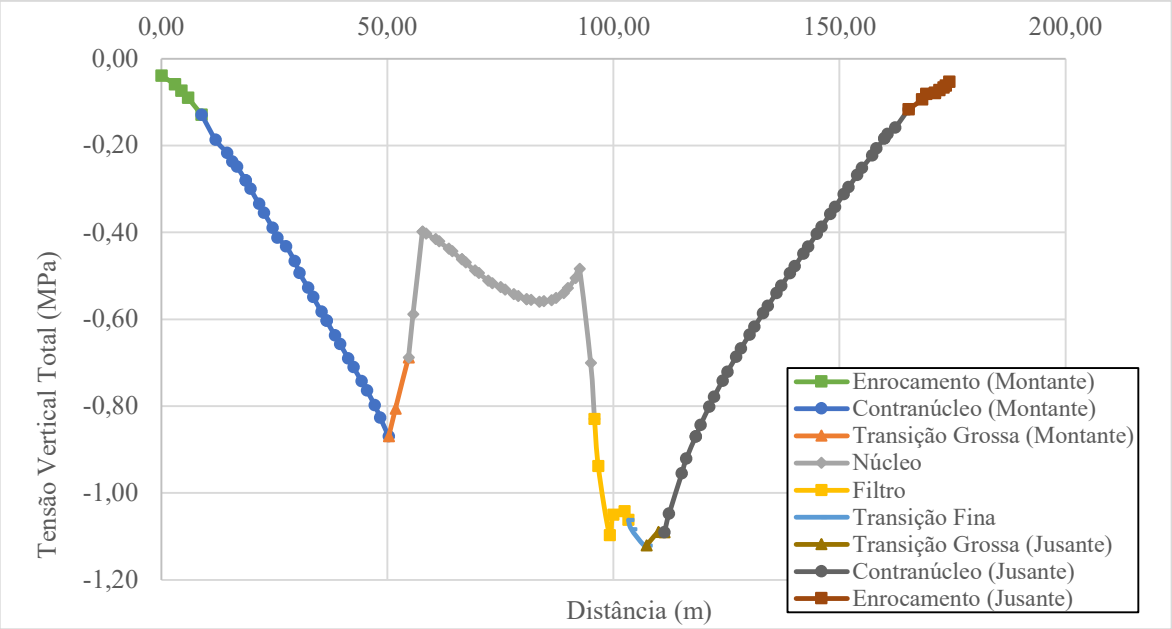


Figura 7. Tensões verticais totais ao longo de uma linha longitudinal, na parte central da barragem, ao término da construção. (A Autora, 2025).

Esse resultado era esperado, uma vez que os enrocamentos, filtros e materiais de transição apresentam maior rigidez e menor compressibilidade em comparação ao núcleo. Como consequência das diferenças de deformabilidade entre os materiais, o núcleo tende a sofrer maiores deslocamentos sob o peso próprio do maciço, mobilizando tensões cisalhantes nas interfaces e promovendo transferência de carga para as regiões adjacentes.

Durante a fase de enchimento do reservatório, observa-se ainda uma redistribuição adicional das tensões internas, associada ao processo de umedecimento dos materiais de montante. Esse processo tende a reduzir parcialmente as tensões em determinadas regiões do maciço, efeito relacionado à elevação do nível d'água e à alteração das condições hidromecânicas da estrutura.

Os resultados obtidos estão em consonância com observações reportadas na literatura, corroborando por exemplo com as observações de Carvalho (2018), Law (1975), Orgler (1983) e outros trabalhos que evidenciam a transferência de tensões do núcleo para as zonas laterais mais rígidas do maciço.

Assim, os resultados da modelagem numérica confirmam a ocorrência do efeito de arqueamento na seção analisada, evidenciando a transferência de tensões do núcleo para as zonas laterais mais rígidas do maciço, comportamento compatível com o observado em estudos teóricos e experimentais sobre barragens de terra-enrocamento.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise do comportamento tensão–deformação de uma barragem de terra-enrocamento pertencente a um aproveitamento hidrelétrico no semiárido brasileiro, com foco na investigação do efeito de arqueamento por meio de modelagem numérica com acoplamento hidromecânico em solos não saturados. A simulação foi realizada pelo método dos elementos finitos utilizando o código CODE_BRIGHT, considerando o processo construtivo da barragem e o enchimento do reservatório até a cota mínima de operação.

Os resultados mostraram que a distribuição de tensões no interior do maciço é fortemente influenciada pelas diferenças de rigidez entre os materiais que compõem a barragem. Observou-se uma redução das tensões verticais na região do núcleo, material mais deformável, acompanhada de concentração de tensões nas zonas de transição e nos enrocamentos laterais, mais rígidos. Esse comportamento confirma a ocorrência do efeito de arqueamento, fenômeno amplamente discutido na literatura para barragens de terra e enrocamento.

A análise quantitativa realizada a partir da comparação entre a tensão vertical teórica estimada e a tensão obtida na simulação evidenciou uma razão aproximada de 0,54, indicando que cerca de 46% da tensão vertical foi redistribuída para os materiais adjacentes, caracterizando um arqueamento significativo no núcleo da barragem.

Observou-se ainda que a evolução do campo de tensões foi influenciada pela particularidade do empreendimento estudado, no qual o enchimento do reservatório ocorreu concomitantemente à construção do maciço, resultando em um comportamento hidromecânico mais complexo e em ajustes contínuos na redistribuição das tensões ao longo do processo construtivo.

Os resultados obtidos demonstram que a modelagem numérica hidromecânica acoplada em meios porosos não saturados constitui uma ferramenta eficaz para a análise do comportamento de barragens de terra-enrocamento, permitindo investigar mecanismos internos de redistribuição de tensões e aprimorar a compreensão do fenômeno de arqueamento. Tais análises contribuem para o desenvolvimento de estudos mais realistas do comportamento dessas estruturas, auxiliando na avaliação de desempenho e no aprimoramento dos critérios de projeto e segurança de barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil) (2025). *Relatório de segurança de barragens 2024-2025*. Brasília, DF. 129p.

Alonso, E.E.; Gens, A.; Josa, A. (1990) A constitutive model for partially saturated soil. *Géotechnique*, [London], v. 40, n. 3, p. 405-430. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.405.

Carvalho, I.M. (2018) *Estudo Paramétrico do Efeito de Arco em Barragens de Terra*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Cruz, P.T. (2004) 100 *Barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 648 p. ISBN: 978-85-8623-802-4.

Global Energy Monitor (2024). Energy profile: Brazil. Disponível em: https://www.gem.wiki/Energy_Profile%3A_Brazil. Acesso em: 25 jun. 2025.

Law, T.C. (1975). *Deformations of earth dams during construction*. 364 p. Thesis (Ph.D.) - University of Alberta, Edmonton.

Orgler, B.L. (1983) *Tensões e Deslocamentos em Barragens de Terra e Enrocamento durante a construção*. Exame de Proposta de Dissertação de Mestrado, PUC/RJ.

Pereira, J.H.F. (1986) *Simulação da construção e do primeiro enchimento do reservatório de barragens zonadas de terra e enrocamento pelo método dos elementos finitos*. 1986. 150 p. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.

Souza, K.I.S. (2008). *Barragens de enrocamento com face de concreto: análise de tensões pelo método dos elementos finitos na fase construtiva por etapas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Van Genuchten, M. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, [EUA], v. 44, n. 5, p. 892–898.

Veiga Pinto, A. (1983) *Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento*. 157 p. Tese (grau de Especialista e investigador auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil). Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, PT, 1983. (Prémio Gulbenkian de Ciência e Tecnologia, 1985).