DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/46

Influência da Geometria do Vale no Arqueamento do Núcleo de Barragens de Enrocamento.

Jaime Andres Castañeda Barbosa
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, jaime.barbosa@bvp.eng.br

Paulo Roberto da Costa Cella
Diretor Técnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, paulo.cella@bvp.eng.br

Pablo Fernando Sanchez
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, pablo.sanchez@bvp.eng.br

Lucas Faria
Engenheiro Geotecnico, BVP Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucas.faria@bvp.eng.br

Mariane de Jesus Pereira da Silva
Engenheira Geotecnica, Vale, Belo Horizonte, Brasil, mariane5.silva5@vale.com

Carlos Alex Lima
Geologo, Vale, Belo Horizonte, Brasil, carlos.alex.lima@vale.com

RESUMO: O arqueamento no núcleo argiloso compactado de barragens zoneadas de enrocamento constitui um fenômeno mecânico associado à redistribuição de tensões decorrente de incompatibilidades deformacionais entre núcleo, filtros, enrocamento e fundação. O presente estudo analisa o arqueamento de tensões em uma barragem de contenção de rejeitos implantada em vale encaixado, avaliando a influência da inclinação dos taludes, da geometria do vale e das condições de fundação sobre a redistribuição de tensões e os recalques diferenciais. A investigação foi conduzida por meio de modelagem numérica tridimensional considerando as etapas construtivas, a consolidação progressiva das camadas inferiores e o deslocamento relativo nas interfaces núcleo, transição e enrocamento. Adicionalmente, avaliou-se a adoção de núcleo com trecho inferior vertical e superior inclinado. Os resultados indicam que a configuração parcialmente inclinada melhora a adaptação às condições geométricas do vale, reduz concentrações de tensões e mitiga o risco de fissuração associada ao arqueamento. Conclui-se que a consideração integrada da geometria do vale, das condições de fundação e da configuração do núcleo é fundamental para a segurança estrutural de barragens de rejeitos implantadas em ambientes geológicos complexos.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de enrocamento; Núcleo argilos compactado; Arqueamento de Tensões; Fraturamento Hidraulico; Modelagem Numérica.

ABSTRACT: Arching in compacted clay cores of zoned rockfill dams is a mechanical phenomenon associated with stress redistribution resulting from deformational incompatibilities between the core, filters, rockfill shells, and foundation. This study investigates stress arching in a tailings containment dam constructed in a confined valley, evaluating the influence of slope inclination, valley geometry (L/H ratio), and foundation conditions on stress redistribution and differential settlements. The analysis was performed through three-dimensional numerical modeling, considering construction stages, progressive consolidation of lower layers, and relative displacements at the core–transition–rockfill interfaces. Additionally, a composite core configuration with a lower vertical section and an upper inclined section was assessed. The results indicate that the partially inclined configuration improves adaptation to valley geometry, reduces stress concentrations, and mitigates the risk of cracking associated with arching. It is concluded that the integrated consideration of valley geometry, foundation conditions, and core configuration is essential for the structural safety of tailings dams constructed under complex geological settings.
KEYWORDS: Rockfill dam; Compacted clay core; Stress arching; Hydraulic fracturing; Numerical modeling.

1 INTRODUÇÃO

Barragens de enrocamento com núcleo argiloso compactado são amplamente utilizadas em empreendimentos de mineração para contenção de água e rejeitos. O comportamento mecânico dessas estruturas é influenciado pela interação entre os materiais constituintes, as condições de fundação e a geometria do vale, fatores que afetam diretamente a distribuição de tensões e deformações no núcleo argiloso.

Entre os mecanismos que influenciam o desempenho dessas barragens destaca-se o efeito de arqueamento, fenômeno associado à redistribuição de tensões decorrente da diferença de rigidez entre os materiais da barragem, a fundação e os encontros laterais. Esse processo pode reduzir as tensões efetivas em determinadas regiões do núcleo, favorecer concentrações de deformações e, em casos extremos, contribuir para o desenvolvimento de fraturamento hidráulico.

Estudos experimentais, observações de campo e modelagens numéricas demonstram que a intensidade do arqueamento é influenciada por fatores como a geometria do vale, o contraste de rigidez entre materiais, as condições de fundação e a sequência construtiva adotada (Ling et al., 2013; Chen et al., 2011; Ding et al., 2013; Li et al., 2023; Liu e Wang, 2015; Yang et al., 2021). Apesar dos avanços obtidos, o comportamento tridimensional associado ao arqueamento ainda demanda investigações adicionais, especialmente em barragens implantadas em vales encaixados e sob condições geológicas complexas.

Neste contexto, o presente trabalho investiga os mecanismos de arqueamento em uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso compactado inclinado por meio de modelagem numérica tridimensional. São analisadas as distribuições de tensões e deformações, bem como a ocorrência de plastificação e o potencial desenvolvimento de fraturamento hidráulico, considerando os cenários de final de construção e reservatório na elevação final de operação. O estudo busca avaliar a influência da geometria do vale, da inclinação do núcleo, do arranjo geométrico da barragem e das condições de contorno adotadas na modelagem numérica sobre o comportamento tensão e deformação da estrutura.

2 METODOLOGIA

2.1 Parâmetros geotécnicos e modelagem da barragem

O comportamento tensão–deformação dos materiais constituintes da barragem foi avaliado por meio de modelagem numérica tridimensional, sendo os resultados analisados em cortes longitudinais e transversais representativos do modelo. Assim, a transferência de tensões observada na barragem pode ser prevista por essa análise, permitindo a estimativa de possíveis condições associadas ao arqueamento de tensões e fraturamento hidraulico.

Para simular a construção da barragem em etapas, o maciço foi dividido em 49 etapas e nivel freatico com borda livre de 3 metros. As Tabelas 1 e 2 apresentam alguns parâmetros geotécnicos dos modelos constitutivos de mohr coulomb, Hoek Brown e hiperbólico (HSM) utilizados nas análises.

A Figura 1 apresenta o sequenciamento construtivo da barragem de enrocamento. Neste artigo, foram analisadas as seções transversal e longitudinal crítica por meio de modelagem 2D extraidas do modelo tridimensional (3D).

Tabela 1. Parâmetros geotécnicos dos modelos constitutivos Mohr-Coulomb e Hoek-Brown.

Material	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	φ (º)	k (m/s)	k_v/k_h	UCS (MPa)	GSI	m_i	D	E_0 (Mpa)	v
Filtro	20	0	35	$5{,}3\times10^{-4}$	1		-			80,00	0,33
Núcleo	19	21,0	28,9	1×10^{-7}	0,1		-			25,70	0,38
R2	23	-		5×10^{-6}	1	50,00	65	20	0	24.000,00	0,40
R1	22	-		5×10^{-6}	1	25,00	35	20	0	1.300,00	0,40
Reforço	19	0	35	5×10^{-5}	0,1		-			25,00	0,33
Aterro	19	12,9	30,9	1×10^{-7}	0,1		-			15,00	0,40

Rejeito	18	0	25	$5.3x10^{-4}$	1	-		8,00	0,40
E. xisto	20	Envoltória de Leps Superior, 1970		$6,65x10^{-5}$	1	-		30,00	0,30
Q. Pein	19	0	35	$6,65x10^{-5}$	1	-		30,00	0,30

Tabela 2. Parâmetros geotécnicos do modelo constitutivo hiperbólico Hardening Soil.

Material	c' (kPa)	ϕ'(º)	$E_{ref}50$ (kPa)	$E_{ref}oed$ (kPa)	$E_{ref}ur$ (kPa)	ν_{ur}	m	p_{ref} (kPa)	R_f
Enrocamento	0	42	40000	40000	200000	0,2	0,8	100	0,9

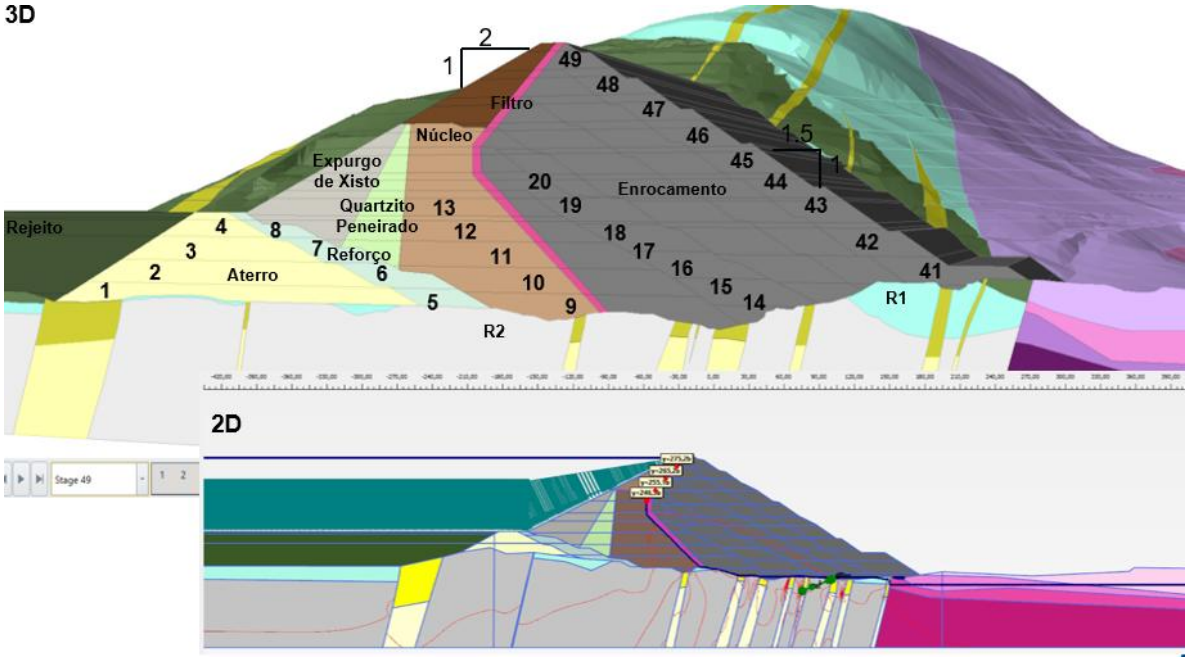


Figura 1. Sequenciamento construtivo da barragem de enrocamento com núcleo argiloso compactado: modelagem bidimensional (seção transversal) e tridimensional.

2.2 Modelo de elementos finitos

Este trabalho estabelece um modelo numérico com base em um projeto real. A altura máxima da barragem é de aproximadamente 100 m, a largura do coroamento é de 11,2 m, a inclinação do talude de montante é de 1:2 e a do talude de jusante é de 1:1,5. O núcleo argiloso compactado está localizado na região central, ligeiramente deslocado para montante nas etapas finais, sendo sua base apoiada sobre fundação considerada competente do ponto de vista geomecânico.

O modelo tridimensional foi desenvolvido por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF) no software RS3. A discretização foi realizada por meio de uma malha híbrida, composta por elementos tetraédricos de quatro nós (4-noded tetrahedra), com densidade definida pelo usuário. Foi adotado refinamento progressivo nas regiões com maiores gradientes de tensões e deformações, especialmente na interface núcleo e filtro e na transição núcleo e fundação, onde se espera maior concentração de tensões associadas ao fenômeno de arqueamento. A convergência numérica foi verificada por meio de análise de sensibilidade de malha, assegurando que os resultados obtidos fossem independentes do grau de discretização adotado (Figura 2 e Figura 3).

A origem do sistema de coordenadas foi definida na interseção entre a base da seção de maior altura da barragem e a fundação. O eixo x corresponde à direção transversal ao reservatório, o eixo y à direção longitudinal do reservatório (vale encaixado) e o eixo z à direção vertical. Para evitar efeitos de borda, o domínio do modelo foi estendido para dimensões de 1.500 × 1.500 m no plano horizontal, de modo a minimizar a influência das condições de contorno nos resultados obtidos nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10).

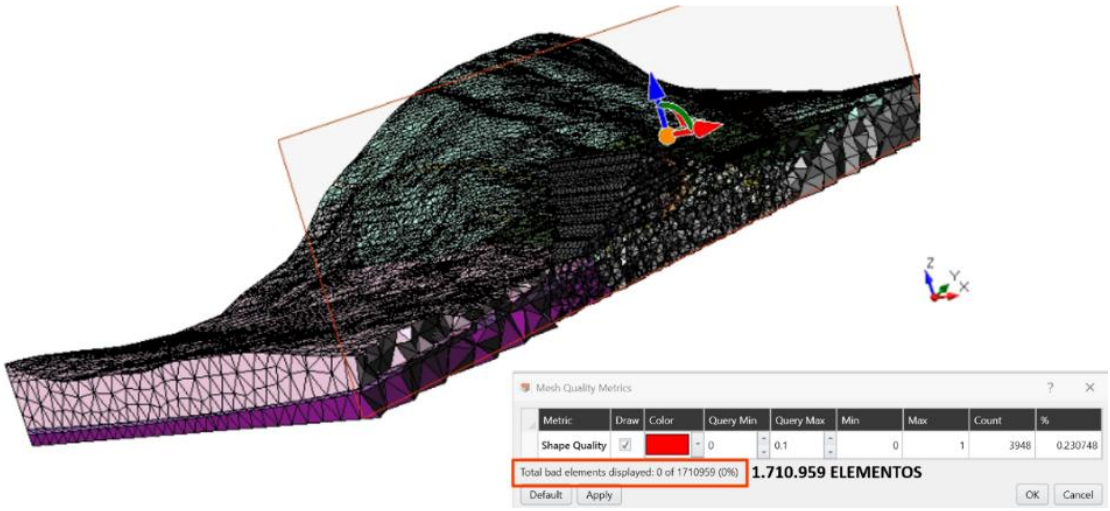


Figura 2. Discretização em elementos finitos do modelo tridimensional desenvolvido no software RS3.

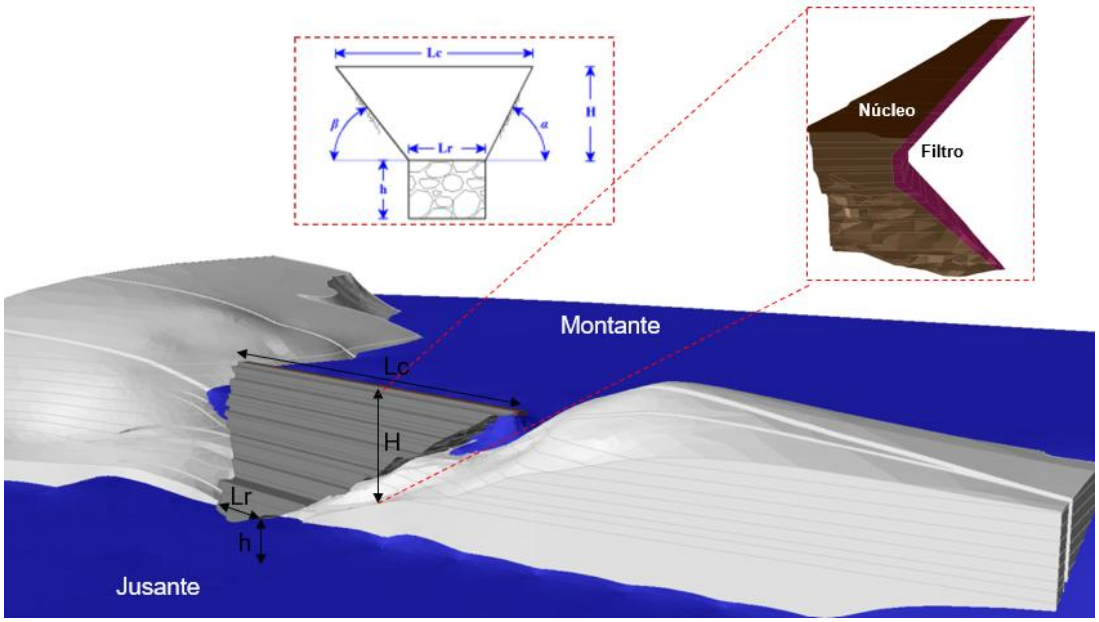


Figura 3. Modelo tridimensional da barragem de enrocamento, com indicação das dimensões geométricas do maciço, das encostas adjacentes e do reservatório.

Neste artigo, o coeficiente de arqueamento R_L é definido como a razão entre a tensão vertical no elemento (σ_z) e o peso próprio da coluna de solo acima do ponto considerado (γh) equação 1:

$$R_L = \frac{\sigma_Z}{\gamma h} \tag{1}$$

onde: σ_Z é a tensão vertical; γ é o peso específico do material; h é a espessura da camada de solo acima do elemento analisado.

Quanto menor o coeficiente de arqueamento, mais intenso é o efeito de arqueamento. Quando R < 1, isso indica que as tensões estão sendo transferidas do núcleo para a camada de transição, para as encostas e para o maciço da barragem. Caso a tensão no núcleo seja reduzida, em função do arqueamento, a valores inferiores à pressão de água no mesmo nível, podem ocorrer fissuras devido ao excesso de pressão hidráulica. Como o arqueamento reduz a tensão vertical no núcleo, pode levar ao fraturamento hidráulico. A partir da comparação entre o método das tensões totais, considera-se que a possibilidade de fraturamento hidráulico deve ser avaliada verificando se a pressão da água externa ao núcleo excede a tensão principal intermediária

na face de montante do núcleo. Assim, introduz-se o coeficiente de fraturamento hidráulico K como critério de avaliação equação 2:

$$K = \frac{\sigma_2 + \sigma_T}{P_W} \tag{2}$$

onde: σ_2 é a tensão principal intermediária; σ_T é a resistência à tração do núcleo argiloso compactado (geralmente entre 0 kPa e 50 kPa). Neste estudo, adota-se $\sigma_T = 0\ kPa$ para garantir margem de segurança adequada; P_W é a pressão hidrostática. Quando K ≤ 1, significa que a pressão da água na face de montante (P_W) do elemento considerado é maior ou igual à tensão total local, podendo ocorrer fraturamento hidráulico na superfície de tensões totais. Caso contrário, o fraturamento hidráulico não ocorrerá.

3 RESULTADOS

3.1 Influência da geometria do vale no arqueamento e comportamento tensão e deformação do núcleo

A análise da seção longitudinal representativa (Figura 4 montante) indicou que o núcleo permanece predominantemente submetido à compressão durante a construção. A distribuição do coeficiente de arqueamento apresentada na Figura 5 evidencia a influência da geometria do vale na redistribuição das tensões verticais, com valores variando entre 0,6 e 2,5. Os menores valores foram observados na região central do núcleo e próximos aos encontros com as encostas, caracterizando arqueamento de baixa a moderada intensidade.

Os deslocamentos verticais máximos atingiram aproximadamente 0,91 m na região central do núcleo (Figura 6), permanecendo compatíveis com o comportamento esperado para barragens de enrocamento com núcleo argiloso compactado.

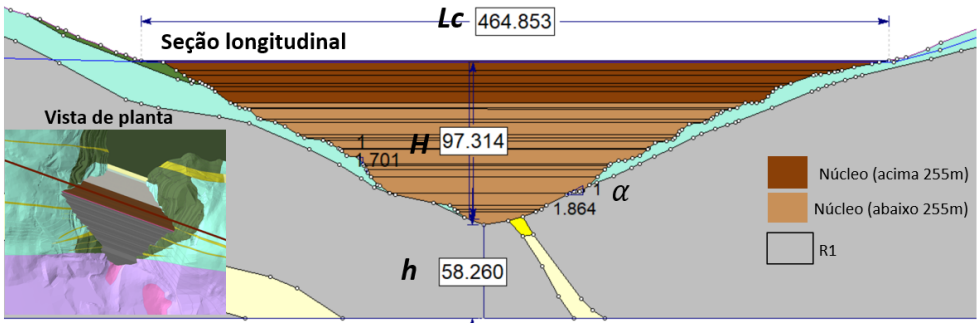


Figura 4. Seção longitudinal da barragem de enrocamento, destacando a geometria do vale e sua relação com o núcleo argiloso compactado.

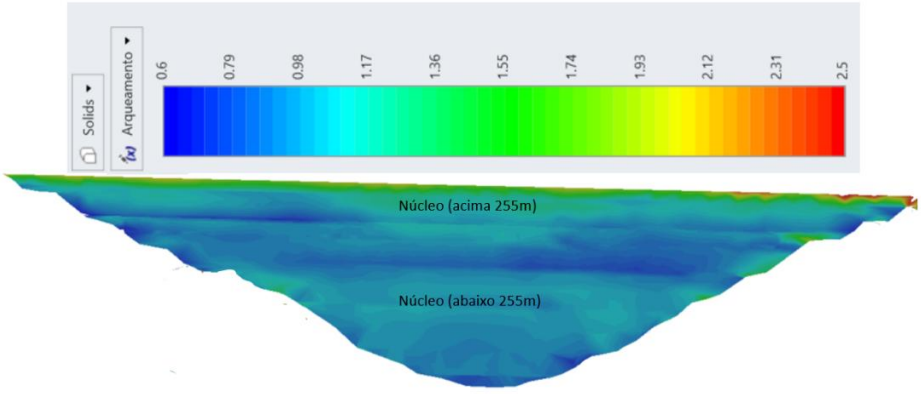


Figura 5. Seção longitudinal da barragem, apresentando a distribuição do coeficiente de arqueamento no núcleo argiloso compactado (Etapa Final).

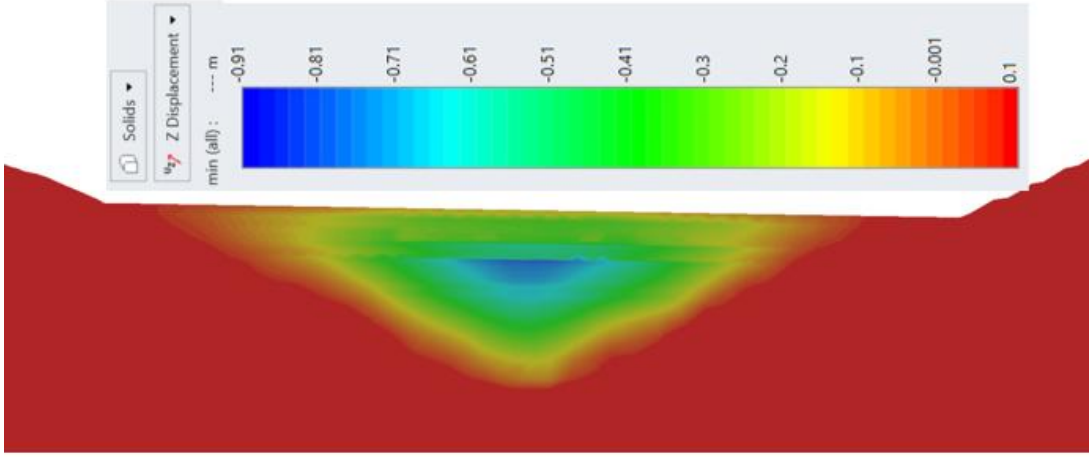


Figura 6. Seção longitudinal da barragem, apresentando a distribuição dos deslocamentos verticais (eixo z) no núcleo argiloso compactado (Etapa Final).

A verificação do potencial de fraturamento hidráulico (Figura 7) não indicou regiões críticas no núcleo, demonstrando a manutenção de estados predominantemente compressivos e a ausência de condições favoráveis ao desenvolvimento de fraturamento hidráulico.

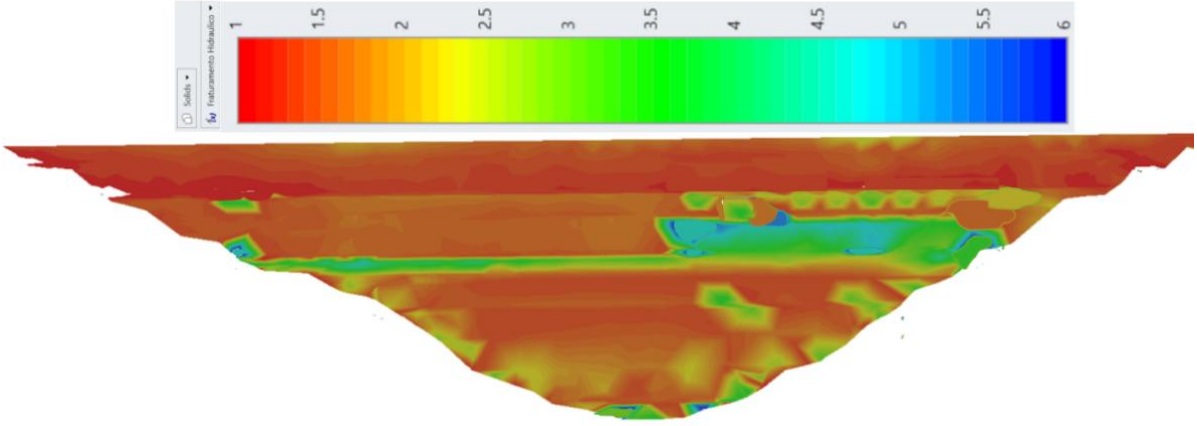


Figura 7. Seção longitudinal da barragem, com verificação do critério de fraturamento hidráulico no núcleo argiloso compactado (Etapa Final).

3.2 Influência da inclinação do núcleo

A avaliação da inclinação do núcleo mostrou que os deslocaentos verticais máximos ocorreram na região central da seção analisada, atingindo aproximadamente 0,91 m (Figura 8).

A distribuição dos deslocamentos evidencia que a inclinação do núcleo influencia diretamente a transferência de tensões entre o núcleo e os materiais adjacentes. Os resultados do coeficiente de arqueamento (Figura 9) indicam redução da intensidade do fenômeno para núcleos inclinados, com valores predominantemente próximos da unidade ao longo da interface núcleo-filtro. Esse comportamento sugere uma redistribuição mais uniforme das tensões verticais e menor suscetibilidade ao desenvolvimento de regiões submetidas a baixas tensões efetivas.

A análise das zonas de plastificação e das tensões principais efetivas mínimas (Figura 10) não indicou condições favoráveis ao fraturamento hidráulico nem a formação de superfícies contínuas de ruptura, evidenciando comportamento estável da barragem nas condições analisadas.

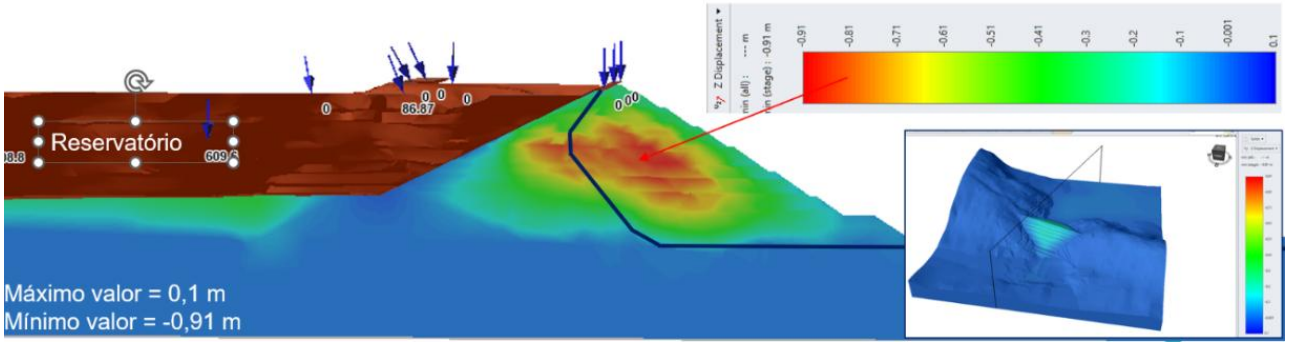


Figura 8. Seção transversal da barragem, apresentando a distribuição dos deslocamentos verticais no maciço de enrocamento (Etapa Final).

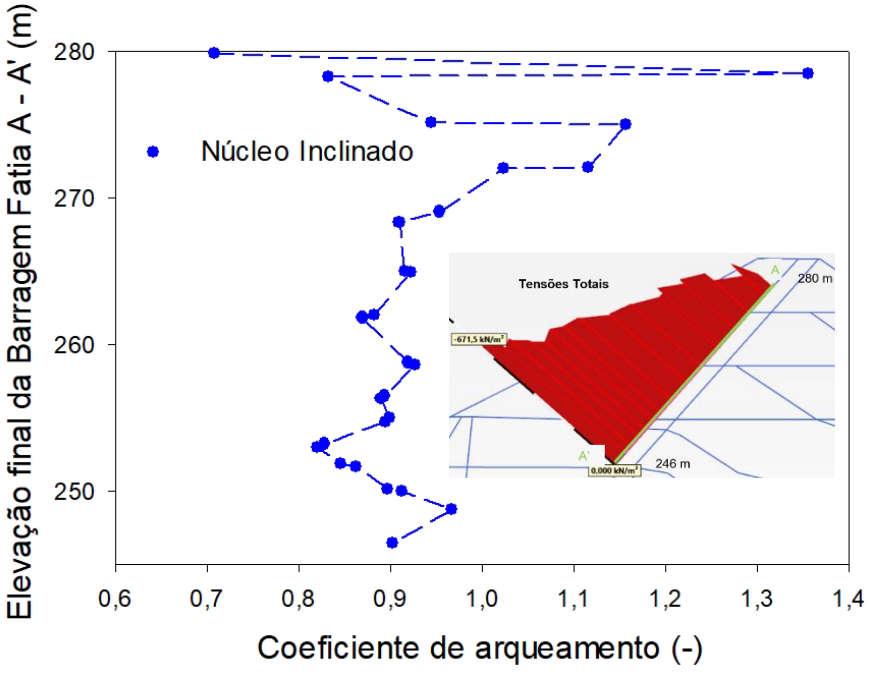


Figura 9. Seção transversal da barragem - fatia A-A' coeficiente de arqueamento na transição.

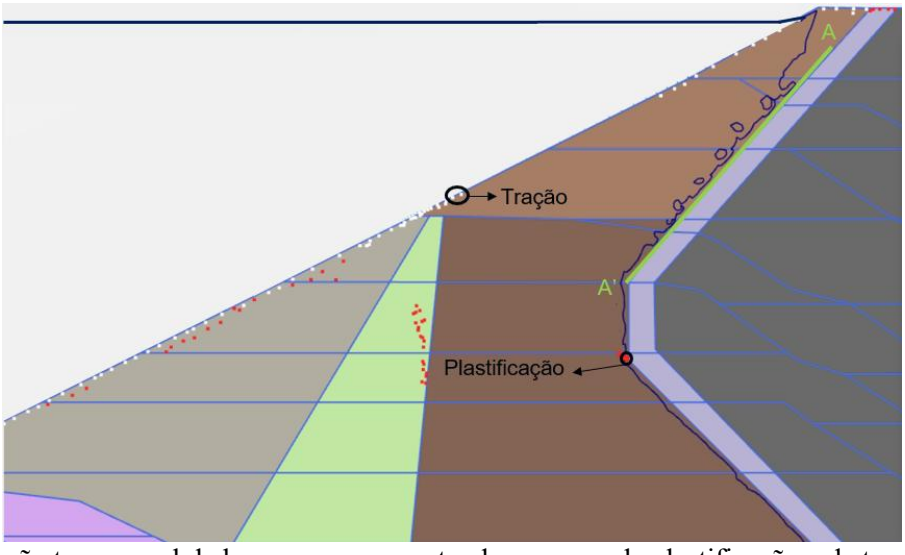


Figura 10. Seção transversal da barragem, apresentando as zonas de plastificação e de tração no núcleo argiloso compactado (Etapa Final).

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises numéricas tridimensionais realizadas, podem ser destacadas as seguintes conclusões:

- A geometria do vale exerce influência significativa sobre o arqueamento do núcleo argiloso compactado, controlando a redistribuição das tensões verticais ao longo da estrutura.
- A adoção de um núcleo inclinado reduziu a intensidade do arqueamento e promoveu distribuição mais uniforme das tensões e deformações, contribuindo para um comportamento estrutural mais favorável.
- Os valores de coeficiente de arqueamento obtidos indicam predominância de arqueamento baixo a moderado, compatível com os deslocamentos observados durante a construção e enchimento do reservatório.
- Não foram identificadas condições favoráveis ao desenvolvimento de fraturamento hidráulico ou superfícies contínuas de plastificação no núcleo argiloso compactado, indicando comportamento estável para as condições analisadas.
- De forma geral, os resultados demonstram que a geometria do vale, a inclinação das encostas e a configuração do núcleo influenciam diretamente o estado de tensões da barragem, sendo parâmetros relevantes para o projeto e avaliação de barragens de enrocamento com núcleo argiloso compactado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BVP e à Vale pela disponibilização dos dados, incentivo e materiais utilizados neste estudo, bem como à PUC-Rio pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bi QT, Ding SY, Jia JC (2013). *Stress and Deformation Characteristics of Asphalt Concrete Core Dam on Deep Overburden Layers*. Applied Mechanics and Materials, 439:1359–1362.

Chen XH, Deng JH, Li P, Hu K (2011). *Arching monitoring and analysis of gravelly soil core wall in Pubugou dam during construction period*. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(S2):3763–3770.

Li Y, Li Y, Zhou B, Wen L, Liu Y, Zhou H, Li W (2023). *Influence of complex geological conditions on core arching of earth-rock dam* (Xi'an, Shaanxi Province, China). Structures, 51:1564–1578.

Ling J, Hu WY, Meng FL, Deng JH, Jia-wei C (2013). *Arching effect analysis of core wall in Pubugou dam*. Rock and Soil Mechanics, 34(07):2031–2035.

Liu Z, Wang C (2015). *The Analysis of Stress, Deformation and Arch Effect of the Lianghekou Earth-rockfill Dam*. Indian Geotechnical Journal, 46(1):77–84.

Yang C, Xue HB, Dang FN, Wang H (2021). *Mechanism and influence range of stress arching effect of CFRD in narrow valley regions.* Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 43(S1):214–218.