XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/20

Avaliação de Mistura Solo-Bentonita Aplicada como Núcleo de Barragem de Terra

Alisson do Nascimento Lima
Professor do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Brasil, alisson.lima@ufmt.br

Carina Silvani
Doutora Professora do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, carinasilvani@gmail.com

Jorge Luiz Beja Filho
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, jorge.luiz@estudante.ufcg.edu.br

Samuel de Lima Lopes
Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, lima.lopes@estudante.ufcg.edu.br

Abraham Augusto Barbosa Gadelha
Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, abraham.augusto@estudante.ufcg.edu.br

RESUMO: O uso de barragens de terra como reservatórios de água para múltiplas finalidades é uma prática amplamente adotada no Brasil. Nesse contexto, para que essas estruturas em solo compactado sejam eficazes na contenção hídrica, é fundamental minimizar ao máximo a percolação pela fundação e pelo maciço, garantindo maior volume de retenção e estabilidade da obra. Diante disso, a presente pesquisa investigou a influência da utilização do núcleo melhorado granulometricamente, em uma barragem de terra zoneada, na quantidade de água percolada através do maciço. A análise foi realizada com o uso do software SEEP/W, baseado no método dos elementos finitos. O núcleo adotado possui geometria trapezoidal, com base menor fixa de 8 metros e base maior variando entre 20, 45 e 70 metros, e variando o teor de bentonita, como substituição, na mistura com o solo natural, nos teores de 5%, 15% e 25%, e consequentemente na permeabilidade. Também foi considerada a variabilidade das umidades de compactação: 7%, 11% e 15%. Com os resultados de vazão para cada simulação, obteve-se que o teor de bentonita aplicado tem influência direta na redução da percolação, onde quanto maior o teor de bentonita menor será a vazão de percolação, mostrando-se eficiente na otimização do núcleo no que diz respeito ao controle da vazão de percolação.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de terra, Bentonita, Percolação, Modelagem numérica, SEEP/W.

ABSTRACT: The use of earth dams as water reservoirs for multiple purposes is a widely adopted practice in Brazil. In this context, for these compacted soil structures to be effective in water containment, it is essential to minimize seepage through the foundation and the embankment, ensuring greater retention volume and structural stability. This research investigated the influence of using a granulometrically improved core in a zoned earth dam on the amount of water seeping through the embankment. The analysis was performed using the SEEP/W software, based on the finite element method. The core adopted has a trapezoidal geometry, with a fixed crest width of 8 meters and a base width varying between 20, 45, and 70 meters. The bentonite content was varied as a replacement in the mixture with the natural soil at levels of 5%, 15%, and 25%, consequently altering the permeability. The variability of compaction moisture contents was also considered at 7%, 11%, and 15%. Based on the flow rate results for each simulation, it was found that the bentonite content has a direct influence on seepage reduction. Higher bentonite contents resulted in lower seepage flow rates, proving to be efficient in core optimization regarding seepage flow control.

KEYWORDS: Earth dams, Bentonite, Seepage, Numerical modeling, SEEP/W.

1 INTRODUÇÃO

As barragens se consolidaram como infraestruturas estratégicas de elevada relevância econômica, ambiental e social. No que tange à integridade estrutural, a garantia da segurança de uma barragem é condicionada à mitigação de mecanismos críticos de falha. Conforme preconizado por Massad (2010), o projeto e a operação dessas estruturas devem assegurar a estabilidade contra: transbordamento, piping (erosão interna), o fenômeno de areia movediça e instabilidade de taludes devido, por exemplo, ao esvaziamento rápido. Para mitigar os riscos associados aos mecanismos de ruptura previamente descritos e garantir que a estrutura opere dentro dos limites de segurança, o projeto de engenharia deve contemplar soluções que controlem rigorosamente o fluxo interno de água e a estabilidade do maciço.

Nesse sentido, as barragens de terra zoneadas surgem como uma solução estratégica, sendo projetadas para otimizar o uso de materiais locais por meio de um zoneamento do aterro fundamentado na permeabilidade e nas propriedades geomecânicas dos solos disponíveis. Nesse sistema, o núcleo central desempenha a função primordial de controle da linha freática, exigindo propriedades definidas para reduzir a percolação a níveis admissíveis e garantir a integridade da estrutura (Abdel-Kawy *et al*., 2021).

Em cenários onde a jazida local não apresenta solos com coeficientes de permeabilidade (k) satisfatórios para assegurar a estanqueidade, a técnica de melhoramento com a adição de material argiloso se torna uma alternativa tecnicamente viável (Basear *et al*., 2018). A incorporação desse mineral à matriz do solo natural visa, primordialmente, o incremento do teor de finos e a alteração da estrutura porosa. De acordo com Benson *et al*. (1994), a eficácia dessa mistura reside na capacidade de expansão da fração bentonítica dentro dos poros interconectados. Esse fenômeno reduz o diâmetro dos vazios que conduzem o fluxo, governando o comportamento hidráulico da camada e resultando em uma redução do coeficiente de permeabilidade, o que permite o atendimento aos requisitos normativos de segurança hídrica.

A eficácia da bentonita na redução do coeficiente de permeabilidade dos solos tem sido documentada na literatura técnica. Estudos conduzidos por Lukiantchuki (2007), Camargo (2012), Baziar *et al*. (2018) e Lima *et al*. (2026) investigaram o comportamento de misturas solo-bentonita aplicadas como camadas impermeabilizantes de aterros sanitários e núcleos de barragens. Estes resultados experimentais fundamentam a aplicabilidade do material em obras geotécnicas, sugerindo que a adoção de núcleos de barragens de terra compostos por solo-bentonita possa ser uma estratégia eficaz para o controle do fluxo.

O uso da bentonita para o incremento do teor de finos e da plasticidade vem se destacando como uma alternativa técnica ao emprego de aglomerantes químicos tradicionais, como cimento e cal, na otimização da estanqueidade de núcleos de barragens. Além da viabilidade técnica, a disponibilidade do material no cenário regional reforça seu potencial de aplicação. Segundo dados de Cutrim *et al*. (2015) e do Governo da Paraíba (CINEP-PB, 2025), o estado é um protagonista estratégico no setor mineral, apenas em 2014, a Paraíba registrou uma produção de 513.000 toneladas de bentonita, o que representava, à época, cerca de 90% da produção nacional e 5% da demanda mundial.

Nesse contexto, a presente pesquisa avaliou a efetividade de misturas solo-bentonita para realização de núcleos de barragens de terra. O foco do estudo consistiu na análise do controle da percolação e na quantificação da vazão através de simulações numéricas no *software* SEEP/W, visando validar a eficiência hidráulica dessa solução para a engenharia de barragens.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Os materiais utilizados nas simulações de fluxo em barragens consistiram em um solo natural (SN), proveniente de uma jazida localizada no município de Campina Grande–PB, e em misturas desse material contendo substituições em volume de 5, 15 e 25% de argila bentonítica (B). A escolha desses teores foi fundamentada nos valores adotados por Baziar *et al.*2018*,* utilizados como referência para a definição das

composições avaliadas neste estudo. Os materiais e misturas solo-bentonita (SB) foram caracterizados por Lima *et al*., (2026), conforme a Tabela 1.

A incorporação de bentonita ao solo natural confere às misturas, apresentadas na Tabela 1, o aumento do índice de plasticidade (IP) através do aumento do teor de finos e do aumento do índice de atividade, como observado por Schmitz *et al*., (2004), Silva (2017) e Costa (2019), sendo um indicador direto da transição de seu comportamento geotécnico. Estas modificações evidenciam a possibilidade da utilização dessas misturas como núcleo argiloso em barragens de terra.

Tabela 1. Propriedades geotécnicas dos solos e misturas solo-bentonita

Parâmetro	Norma Técnica	Solo Natural (SN)	Bentonita (B)	SB5	SB15	SB25
Limite de Liquidez (%)	ASTM D4318/2018b	-	178	22	26	28
Limite de Plasticidade (%)		-	60	18	19	20
Índice de Plasticidade (%)		Não Plástico	118	4	7	8
Índice de Atividade IP/%< 2μm	-	-	3.16	0.29	0.39	0.35
Massa específica dos grãos (g/cm³)	ASTM D5550/2014	2.67	3.08	2.76	2.75	2.75
Pedregulho (4.75 mm < diâmetro < 60 mm) (%)	ASTM D6913/2017	4.16	-	3.96	5.39	4.27
Areia Grossa (2.0 mm < diâmetro < 4.75 mm) (%)		2.58	0.09	2.46	2.06	2.59
Areia Média (0.425 mm < diâmetro < 2.0 mm) (%)		12.10	5.30	11.76	9.95	8.15
Areia Fina (0.075 mm < diâmetro < 0.425 mm) (%)		45.85	36.87	45.40	40.11	39.63
Silte (0.005 mm < diâmetro < 0.075 mm) (%)		21.63	15.29	21.32	22.03	19.48
Argila (diâmetro < 0.005 mm) (%)		13.67	42.46	15.11	20.46	25.87
Diâmetro Médio das Partículas, D_{50} (mm)	-	0.15	0.017	0.14	0.12	0.10
CEC (meq/100 g)	C837 (ASTM 2019)	6.25	103.16	12.5	21.88	34.39
Superfície Específica (m²/g)		48.79	805.08	97.58	170.77	268.36
Classificação SUCS.	D2487 (ASTM, 2018a)	SM	CH	SM	SM	SC

SB5: mistura solo natural bentonita na proporção 95/5; SB15: mistura solo natural bentonita na proporção 85/15; SB5: mistura solo natural bentonita na proporção 75/25

Fonte: adaptado de Lima *et al*. (2026)

Como parâmetros de entrada nas simulações foram usados os coeficientes de permeabilidade (k_{20}), considerando o fluido percolante água obtidos por Lima *et al*. (2026), como apresentados na Tabela 2. Os k_{20} consideram a influência da umidade de compactação e o teor de bentonita presente na composição, sendo assim aplicados como núcleo argiloso. O material referente a parte do maciço (área externa ao núcleo) foi considerado que este era apenas composto pelo solo natural, peso específico 19,5 kN/m³ e coeficiente de permeabilidade de 1,7 x10^{-8} m.s^{-1}.

Tabela 2. Resultados de permeabilidade à água de misturas solo-bentonita

N° do Ensaio	Umidade (%)	Bentonita (%)	Permeabilidade ($m.s^{-1}$)
1	7	5	$1{,}72x10^{-9}$
2	7	25	$1{,}25x10^{-10}$
3	15	5	$6{,}27x10^{-10}$
4	15	25	$3{,}40x10^{-10}$
5	11	15	$4{,}48x10^{-10}$

Fonte: Lima *et al*. (2026)

2.2 Métodos

2.2.1 Barragem Analisada

Para a análise do fluxo e aplicação dos dados de coeficiente de permeabilidade (k20), adotou-se uma seção transversal adaptada por Silvani *et al* (2022) a partir da geometria do maciço do Açude Epitácio Pessoa (Boqueirão), localizado no estado da Paraíba. Visando isolar a influência do núcleo na percolação, a fundação foi modelada sobre um horizonte rochoso impermeável. A geometria do maciço, ilustrada na Figura 1, contempla a instalação de filtros verticais e horizontais compostos por material granular, dimensionados conforme os critérios de filtro de Terzaghi. Para o material drenante, adotou-se uma areia média com coeficiente de permeabilidade da ordem de 10^{-4} m/s. Em conformidade com as práticas executivas de campo, a espessura desses elementos de drenagem foi fixada em 1,5 metros no modelo computacional.

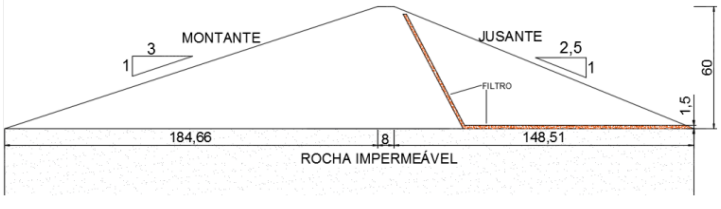


Figura 1. Seção transversal da barragem analisada

Os núcleos trapezoidais utilizados apresentam três tipos de geometria apresentados na Figura 2, com base menor com mesma dimensão da largura do coroamento da barragem (8 metros) e base maior variável em 20 metros, 45 metros e 70 metros.

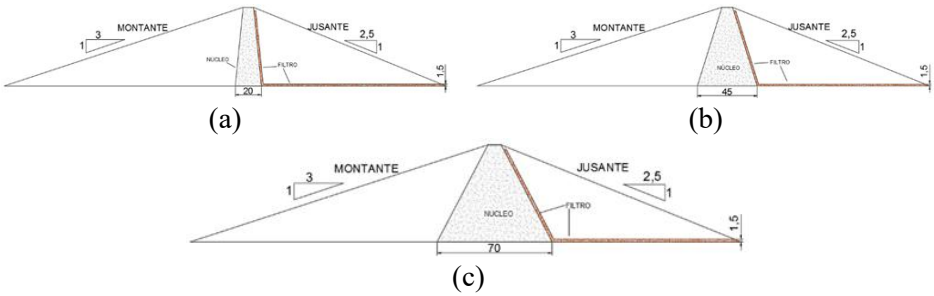


Figura 2. Núcleo com base de (a) 20, (b) 45 e (c) 70 metros.

2.2.2 Análise de Percolação

A fim de mensurar a influência da variação da umidade e do teor de bentonita, como mecanismos da hipótese inicial de redução da percolação, foram obtidos resultados de vazão a jusante para distintos modelos de barragem. A quantificação foi realizada através do Modelo de Elementos Finitos (MEF) utilizando a ferramenta computacional SEEP/W versão estudante da GEOSTUDIO.

As análises foram limitadas pelas condições de contorno inseridas, sendo estas: forma, coeficientes de permeabilidade e nível de água no reservatório. Devido às restrições na versão estudante utilizada, houve

limitações estabelecidas pelo software, tais como a composição do modelo (restrita a três materiais com suas propriedades) e a malha de elementos finitos (limitada a 500 elementos finitos). Devido a isso, foi obtido uma malha com elementos triangulares e quadriláteros de lado 5,1 metros. As vazões foram mensuradas considerando uma seção vertical definida, que distava 3,7 metros da extremidade do talude jusante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados de vazão em m³/dia de todas as simulações numéricas realizadas. Nas seções a seguir são apresentados os gráficos em termos das variáveis independentes consideradas, para facilitação da análise, os dados de vazão (eixo das ordenadas) estão plotados em escala logarítmica.

Tabela 3. Resultados de vazão percolada

BARRAGEM	Base do núcleo (m)	Umidade de Compactação (%)	Teor de Bentonita (%)	Vazão (m³/dia)
Barragem 1	20	7	5	9,85E-06
Barragem 2	20	15	5	4,73E-06
Barragem 3	20	11	15	2,70E-06
Barragem 4	20	15	25	2,17E-06
Barragem 5	20	7	25	8,23E-07
Barragem 6	45	7	5	2,44E-06
Barragem 7	45	15	5	9,24E-07
Barragem 8	45	11	15	6,69E-07
Barragem 9	45	7	25	1,88E-07
Barragem 10	45	15	25	5,10E-07
Barragem 11	70	15	5	1,63E-07
Barragem 12	70	7	5	4,38E-07
Barragem 13	70	11	15	1,18E-07
Barragem 14	70	7	25	3,30E-08
Barragem 15	70	15	25	8,90E-08

3.1 Efeito do Teor de Umidade de Compactação na Percolação

A Figura 3 apresenta a influência da umidade de compactação da mistura para cada um dos tamanhos dos núcleos estudados, considerando diferentes teores de bentonita adicionados. Fica evidente que há uma influência da umidade de compactação para o menor núcleo (Figura 3a), e ainda que o efeito da umidade de compactação se mostrou maior para o menor teor de bentonita (5%). Com exceção da simulação que considera 25% de bentonita em um núcleo de B=20 m, o aumento da umidade de compactação gera diminuição da vazão percolada. Esse resultado pode ser atribuído a incertezas experimentais relacionadas à obtenção do parâmetro de permeabilidade.

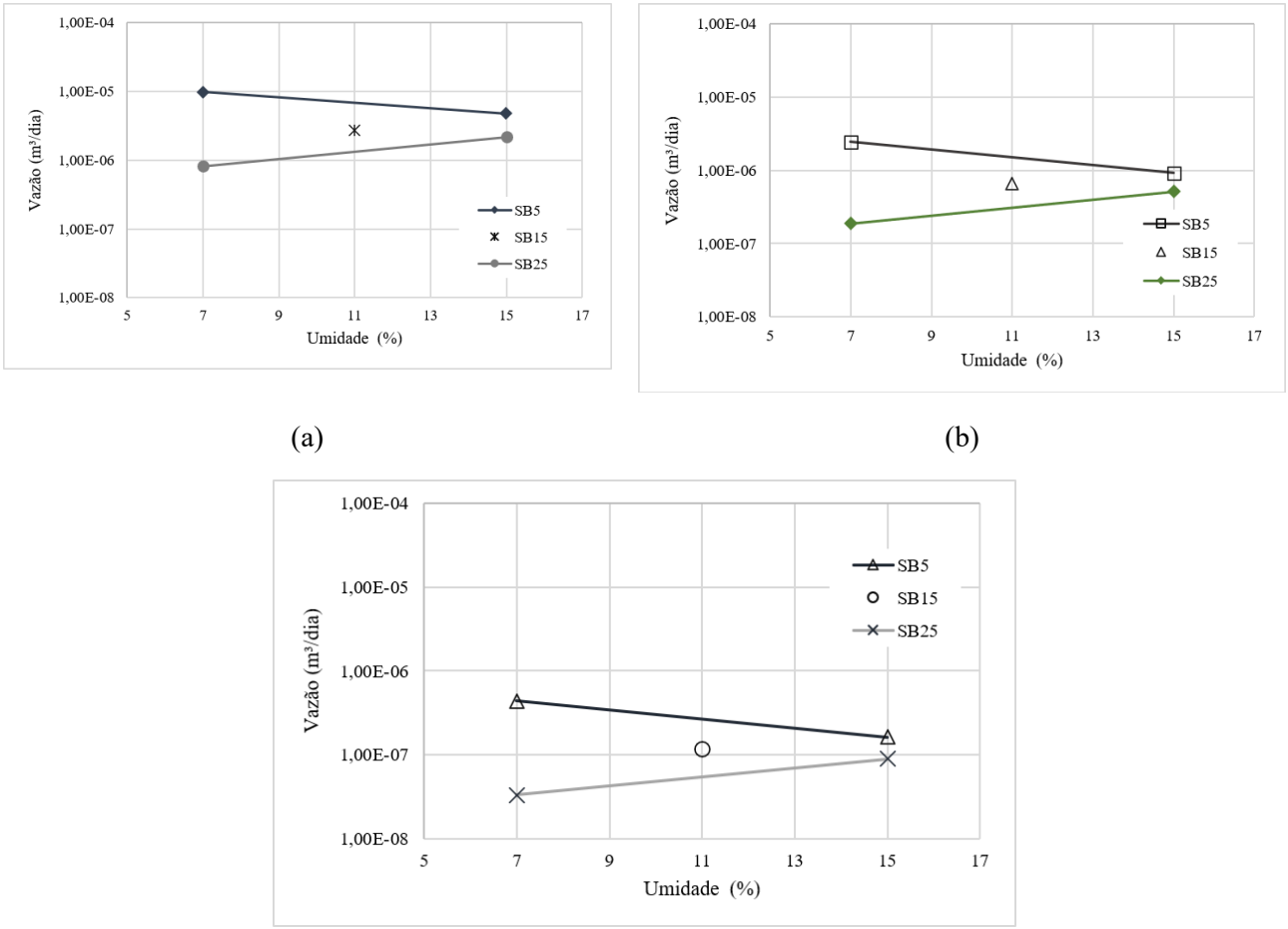


Figura 3. Efeito do teor de umidade de compactação na vazão percolada em tamanhos de núcleo de B=20 m (a) B=45 m (b) e B=70 m (c).

3.2 Efeito da Variação do Teor de Bentonita na Percolação

A Figura 4 apresenta a influência do teor de bentonita na vazão percolada pela barragem. É possível observar que quanto maior o teor de bentonita menor o volume de água percolada, o que demonstra uma influência da bentonita, composto por argilominerais expansivos, responsáveis por preencher os poros e, consequentemente, reduzir o fluxo no solo. Segundo Wang *et al*., (2021) a bentonita diminui a percolação devido às reações expansivas que geram um processo de membrana de hidratação conduzindo a um bloqueio do fluxo da água ao longo do núcleo da barragem. Com isso, quanto maior o teor de bentonita, menor será a vazão de percolação da barragem, especialmente em núcleos de menor tamanho, que mostram maior dependência do material geotécnico presente.

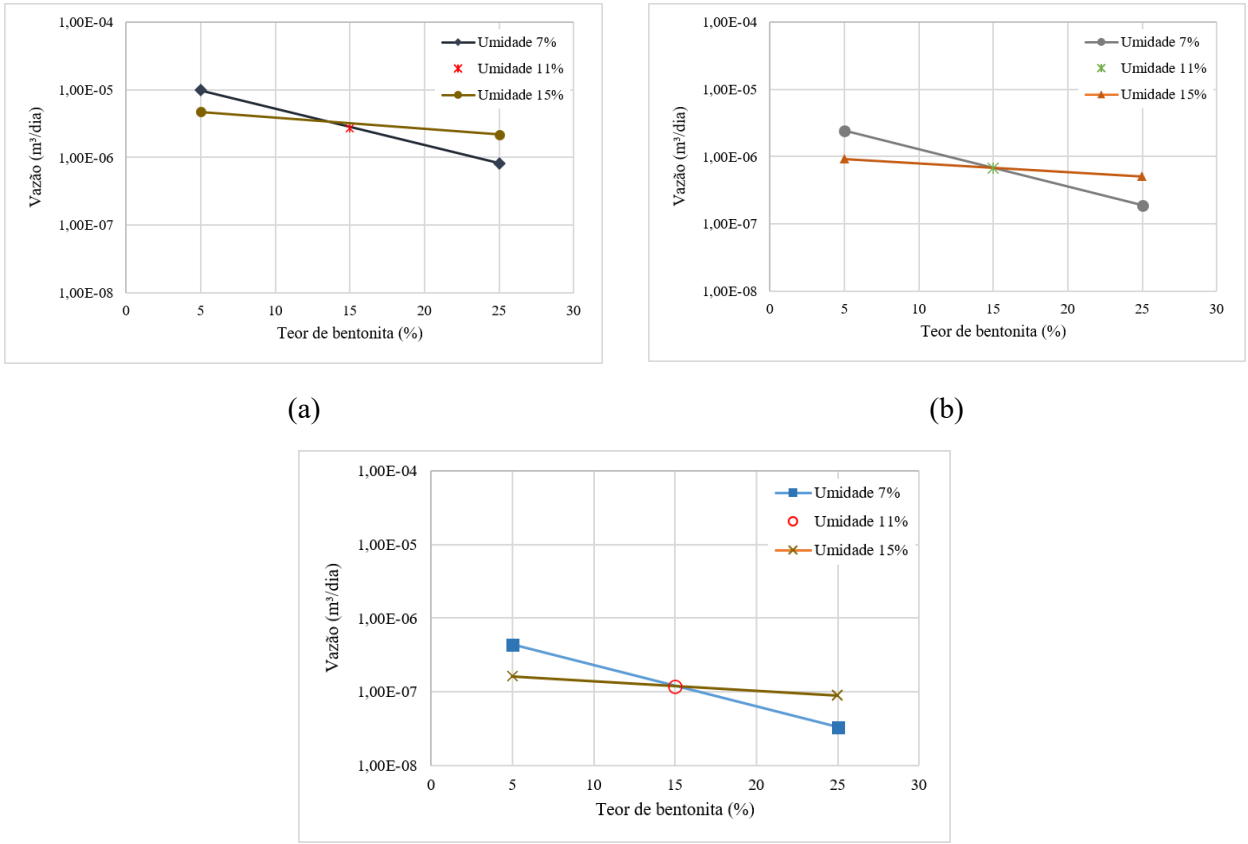
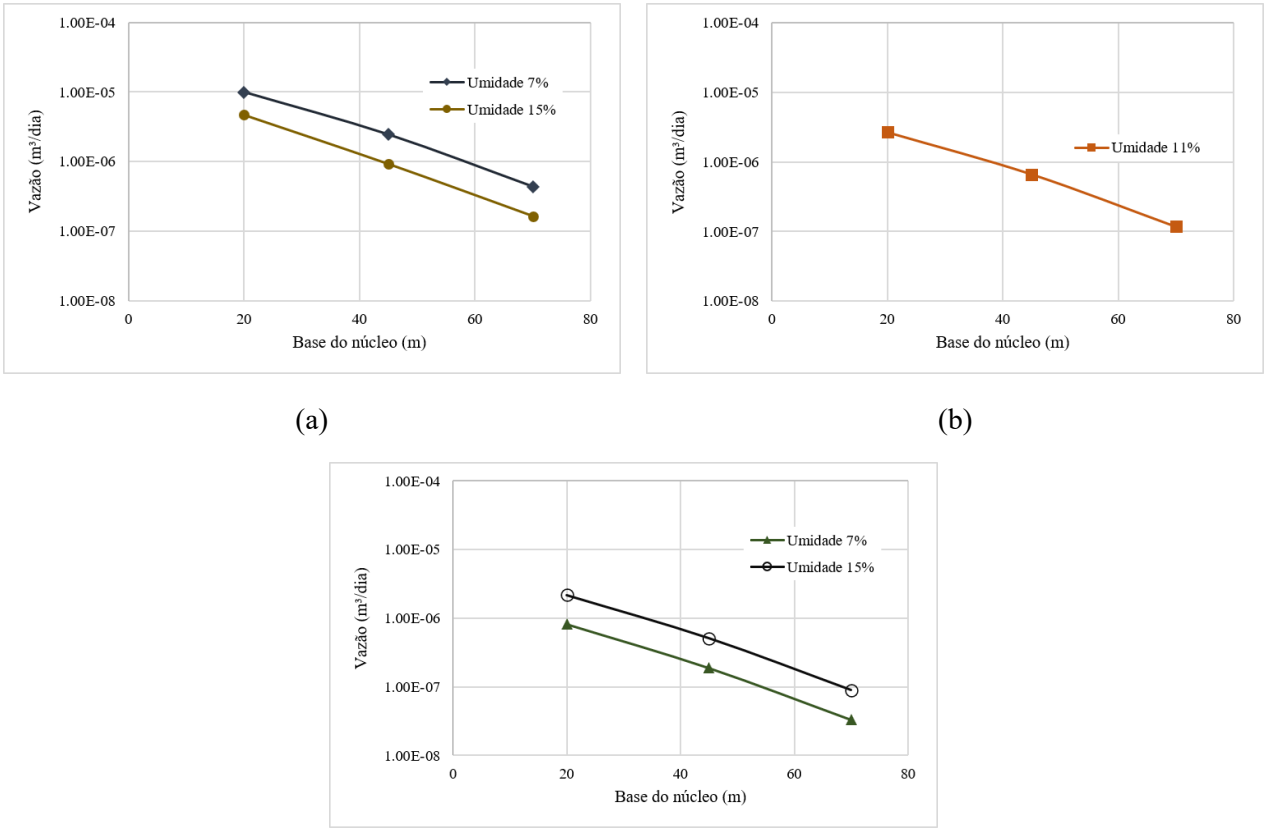


Figura 4. Efeito do teor de bentonita na vazão percolada em tamanhos de núcleo de B=20 m (a) B=45 m (b) e B=70 m (c).

3.3 Efeito do Formato do Núcleo na Percolação

A Figura 5 mostra o efeito do tamanho do núcleo (variação da largura da base maior) na percolação pelo maciço. Os resultados reforçam o que já tinha sido supracitado anteriormente, que núcleos maiores tendem a ter a vazão percolada menor; e que esse efeito é tem maior amplitude quando se observa menores valores de adição de bentonita (5%) e para menores teores de umidade de compactação (7%), como observado na Figura 5a. Ainda este comportamento se estende para os diferentes teores de bentonitas avaliados (Figura 5b e 5c). Este efeito das dimensões do núcleo também foi observado por Abdel-Kawy *et al* (2021).

Logo, é possível inferir que no contexto de grandes núcleos e máximos teores de bentonita, a umidade tem um efeito mínimo. Do ponto de vista econômico, utilizar núcleos de tamanho intermediário (B=45 m), e com teor médio de 15% de bentonita e com umidade superior ou igual 11% obtêm-se a minimização das vazões, utilizando menor quantidade da bentonita como material manufaturado. Ainda, enfatiza-se que as análises foram baseadas em resultados de permeabilidade vertical, logo a recomendação de utilizar teores de mínimos de bentonita (5%) e maiores umidade pode implicar em uma estrutura dispersa e com considerável permeabilidade horizontal, o que poderia comprometer a eficácia da metodologia aqui proposta.



(a) (b)

(c)

Figura 5. Efeito do tamanho do núcleo na vazão percolada para os teores de bentonita de 5% (a) 15% (b) e 25% (c).

4 CONCLUSÕES

A partir das simulações numéricas realizadas para avaliar a influência da geometria do núcleo, do teor de umidade e da adição de bentonita no controle da percolação, é possível elencar as seguintes conclusões:

Observou-se que o incremento do teor de bentonita no núcleo da barragem promove uma redução sistemática da vazão percolada em todos os cenários avaliados. Este comportamento é atribuído à elevada capacidade expansiva da bentonita, que atua na redução da porosidade e, consequentemente, na formação de uma barreira hidráulica mais eficiente.

O aumento da base do núcleo (de 20 m para 70 m) demonstrou ser uma medida eficaz para a dissipação da energia do fluxo, reduzindo a vazão percolada em todas as análises realizadas, independentemente da composição da mistura.

A pesquisa valida diferentes estratégias para a mitigação da percolação em barragens de terra, oferecendo soluções técnicas que variam entre ajustes geométricos e estabilização mineralógica. No entanto são necessário estudos mais amplos a respeito da permeabilidade horizontal e variação volumétrica das misturas.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro da FAPESQ-PB, CAPES e CNPQ ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdel-Kawy, A. O., Aboulatta, N. M., & El-Molla, D. A. (2021) *Effects of core characteristics on seepage through earth dams.* Water Practice and Technology, 16(4), p. 1248–1264. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.053>.

Baziar, M. H., Saeidaskari, J., & Alibolandi, M. (2018) *Effects of Nanoclay on the Treatment of Core Material in Earth Dams*. Journal of Materials in Civil Engineering, 30, 04018250. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002415>.

Benson, C. H., Zhai, H., Wang, X. (1994) *Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. Journal of Geotechnical Engineering.* v. 120, n. 2, p. 366-387.

Camargo, K. R. (2012) *Avaliação da condutividade hidráulica e da resistência ao cisalhamento de mistura solo-bentonita: estudo de um aterro sanitário localizado em Rio Grande*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos, SP.

CINEP – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba. (2025) *A Paraíba é responsável por mais de 90% da produção nacional de bentonita*. Disponível em: <https://www.cinep.pb.gov.br/portal/?page_id=296>. Acesso em: 28 abr. 2025.

Costa, W. W. M. L. (2019) *Estudo da permeabilidade em solos utilizados em camada de base de aterro sanitário no semiárido paraibano*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG. Campina Grande, PB.

Cutrim, A. A., Martin-Cortés, G. R., Valenzuela-Díaz, F. R. (2015) *Bentonitas da Paraíba. 1ª.ed.* Interciência. Rio de Janeiro, RJ.

Lima, A.N., Silva, T.F., Silva, D.L.M. *et al*. (2026) *Soil-contaminant interaction in silty sand-bentonite liners percolated by landfill leachate.* Int. J. Environ. Sci. Technol. 23, 77. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06952-x>.

Lukiantchuki, J. A. (2007) I*nfluência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira impermeabilizante*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP. São Carlos, SP.

Massad, F. (2010) *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. *2. ed. com exercícios resolvidos*. Oficina de Textos. 216 p. São Paulo, SP.

Morandini, T. L. C. (2009) *Condutividade hidráulica e compatibilidade em combinações de solo tropical e bentonita para uso em barreiras*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geotecnia, UFOP. Ouro Preto, MG.

Pinto, C. S. (2006) *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. 3ª ed*. Oficina de Textos. São Paulo, SP.

Roushangar, K. Houshyar, Y. Andalib, G. (2021) *Evaluation of Influencing Factors in Outflow Control and Self-healing Property of Clay Core (case study: Vanyar dam-Iran)*. Advance Researches in Civil Engineering, v. 3, n. 2, p. 55-71.

Schmitz, R. M., Schroeder, C., Charlier, R. (2004) *Chemo-mechanical interactions in clay: a correlation between clay mineralogy and Atterberg limits.* Applied Clay Science, v. 26, n. 1- 4 SPEC. ISS, p. 351–358.

Silva, T. F. (2017) *Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG. Campina Grande, PB.

Silva, T. F. *et al*. (2022) *Comportamento geotécnico de liners de aterros sanitários pelo incremento de bentonita.* In: XX COBRAMSEG, Campinas, SP.

Silvani, C., Lima, A. N., Benetti, M. (2022) *Otimização da Impermeabilidade do Núcleo de uma Barragem de Terra com Base na Razão h/Liv*. In: XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2022, Campinas. Anais do XX COBRAMSEG. Rio de Janeiro: ABMS.

Wang, D. W. *et al*. (2021) *Effect of sand grain size and boundary condition on the swelling behavior of bentonite–sand mixtures*. Acta Geotechnica, v. 16, n. 9, p. 2759-2773.