



2 0 2 5

Avaliação da Aplicabilidade do Rejeito de Britagem Como Material a Ser Utilizado em um Tapete a Montante de Barragem - Análise Comparativa Através do MEF e pelos MRs

Jorge Luiz Beja Filho

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, jorge.beja@hotmail.com

Alisson do Nascimento Lima

Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, alissonnascimentolim@gmail.com

Pedro Raimundo Santana Júnior

Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, pedro.raimundo@estudante.ufcg.edu.br

Vitor Braga de Azevedo

Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, vitorba.eng@gmail.com

Carina Silvani

Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, Brasil, carina.silvani@professor.ufcg.edu.br

RESUMO: Diversas soluções podem ser aplicadas a fim de controlar a percolação em fundações de barragens. O tapete impermeável a montante é uma das técnicas utilizadas que diminui as forças de percolação e vazão através da fundação, sendo necessário materiais de baixa permeabilidade para sua implementação. Ainda, resíduos de mineração vêm se provando como material alternativo para múltiplos usos, podendo servir na execução de tapetes impermeáveis. Logo, a presente pesquisa analisou a influência da inserção de um tapete impermeável a montante de resíduo de britagem de rocha granítica tratado com cimento na vazão de água percolada através da fundação de uma barragem de concreto. Utilizou-se uma abordagem comparativa entre os resultados dos modelos reduzidos (MRs) e computacionais simulados através do método dos elementos finitos (MEF). Foram analisadas três condições, uma barragem sem sistema de controle de percolação e com a utilização de tapetes de diferentes comprimentos (10 e 20 cm). Os resultados apontaram para a eficácia do tapete, o qual reduziu a vazão percolada em 48,67% para os MRs e 35,27% para o MEF na utilização do tapete de 10 cm de comprimento, se mostrando a melhor solução entre os comprimentos estudados. Reforçando, portanto, a viabilidade desse rejeito na prática.

PALAVRAS-CHAVE: Percolação em fundações, Modelos reduzidos, Método dos Elementos Finitos, Tapete Impermeável a Montante, Resíduo de britagem.

ABSTRACT: Several solutions can be applied to control seepage in dam foundations. The upstream impermeable mat is one of the techniques used to reduce the seepage forces and flow through the foundation, requiring low-permeability materials for its implementation. Furthermore, mining waste has proven to be an alternative material for multiple uses and can be utilized in the construction of impermeable mats. Therefore, this research analyzed the influence of inserting an upstream impermeable mat made of granite rock crushing waste treated with cement on the seepage flow through the foundation of a concrete dam. A comparative approach was used between the results of the physical models (PMs) and finite element method (FEM) simulations. Three conditions were analyzed: a dam without a seepage control system, and with the use of mats of different lengths (10 and 20 cm). The results indicated the effectiveness of the mat, which reduced the seepage flow by 48.67% for the PMs and 35.27% for the FEM when using the 10 cm long mat, demonstrating the best performance among the lengths studied. This reinforces the feasibility of using this waste in practice.



KEYWORDS: Seepage in dam foundations, Physical models, Finite Element Method, Upstream Impermeable Mat, Crushing residue.

1 INTRODUÇÃO

A água, por ser um elemento extremamente necessário para o homem, conduziu a ciência a se provar capaz de desenvolver novas tecnologias, a fim de obter controle deste elemento da natureza, visando satisfazer as necessidades do desenvolvimento econômico e social (LIMA, 2019). Surgiram assim, as barragens, tendo como objetivo principal acumular água e garantir à segurança a jusante da obra (QUINTAS, 2002).

A fim de garantir esse objetivo, a percolação de água no corpo e fundação da barragem devem ser minimizadas, pois, podem causar problemas durante a construção e utilização da estrutura. Além disso, a percolação excessiva ocasiona perdas no volume represado, sendo consideradas inaceitáveis em climas áridos, devido à escassez e a importância desse recurso (SOLEYMANI; AKHTARPUR, 2011).

A solução mais econômica para viabilidade da execução desse tipo de obra é a adição de sistemas de controle de percolação, que permitem o aumento da eficiência e segurança da obra através da utilização de técnicas mais simples e materiais que não apresentem grande impacto econômico no custo final da obra. Estes sistemas podem ser compostos por agregados, materiais artificialmente cimentados, geossintéticos, ou até rejeitos e resíduos industriais (LIMA, 2019).

Existem dois tipos de controle percolação, um pelo interior do maciço da barragem e outro através da fundação. *U.S. Army Corps of Engineers* (2004) enfatiza os principais métodos de controle de percolação pelo maciço, sendo eles: taludes planos sem drenos, zoneamento do corpo da barragem e a utilização de drenos verticais, inclinados e horizontais no maciço. Para a fundação, os principais sistemas de controle são: cortina de injeção, tapete impermeável, tapete drenante, trincheira e poços de alívio. As soluções de drenagem devem ser consideradas a jusante e as de impermeabilização a montante e, de forma geral, tais mecanismos são utilizados de forma combinada (ASSIS *et al.*, 2003).

O tapete impermeável a montante amplia o comprimento de percolação, dessa forma, diminuindo a vazão, as forças de percolação e, consequentemente, os gradientes de saída. O dimensionamento do tapete consiste na determinação do comprimento necessário para obter uma vazão admissível pela fundação e segurança quanto a erosão progressiva. Para execução do tapete são necessários materiais de baixa permeabilidade, usualmente solos argilosos compactados (MASSAD, 2010). Entretanto dependendo da localização da obra a disponibilidade de solos argilosos pode ser baixa.

Os agregados são os materiais minerais mais consumidos e produzidos no mundo, sendo cruciais para a indústria da construção civil (ALMEIDA; LUZ, 2009). Segundo Prudêncio (1998), cerca de 20% do volume total dos agregados extraídos e processados se tornam rejeitos e, mesmo que eles sejam classificados como não perigosos segundo a NBR 10004/2024, possuem alta capacidade de gerar danos ambientais devido ao seu modo de armazenamento. Nesse contexto, em busca de compatibilizar o crescimento do setor com a sustentabilidade, pesquisadores estudam as possibilidades da utilização de rejeitos da produção de agregados em diversas áreas na construção civil. Souza (2024) avaliou a estabilização de rejeito de britagem com cimento Portland encontrando aumento da resistência à compressão simples com o aumento do teor de cimento Portland e com o aumento do peso específico de compactação. A adição de aglomerantes como o cimento Portland tende a diminuir os poros da mistura (Yang *et al.*, 2020) permitindo assim que este material seja utilizado para a confecção de tapetes impermeáveis de montante. Destaca-se a utilização do rejeito de britagem neste processo gera uma destinação adequada ao material, aumentando a sustentabilidade da produção de agregados.

Através dos avanços tecnológicos das últimas décadas foram desenvolvidos dois principais métodos para a análise e estudo de barragens: métodos computacionais como Método dos Elementos Finitos (MEF) e uso de modelos reduzidos (MRs). O MEF é uma metodologia muito utilizada para verificação e simulação da percolação de água em barragens de terra. Esse método computacional é caracterizado por dividir a barragem em elementos infinitesimais, representando a barragem em termos matemáticos - através da resolução de equações diferenciais - tendo como parâmetros de entrada os coeficientes de permeabilidades dos materiais (Leal *et al.*, 2024). Somada a análise computacional, a utilização de modelos reduzidos para análise do comportamento das barragens se provou bastante útil nas últimas décadas. Estes modelos são réplicas em escala menor das obras hidráulicas reais, proporcionando uma visão detalhada e controlada dos fenômenos físicos que ocorrem em situações reais (KRÜGER *et al.*, 2015).



2025

Nesse contexto, através do comparativo do MEF e dos MRs, o presente trabalho busca avaliar aplicabilidade do rejeito de britagem - material descartado no processo de produção de agregados para construção civil - tratado com cimento na construção de tapetes impermeáveis de montante de barragens.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais

Os materiais usados na pesquisa foram: areia para execução da fundação do sistema, rejeito de britagem de rocha granítica e Cimento Portland CP V-ARI para execução dos tratamentos de fundação (tapete impermeável de montante), um modelo de corpo de barragem de concreto e um recipiente para conter o modelo reduzido.

2.1.1 Caracterização do Solo e do Rejeito de Britagem

O solo utilizado na simulação da fundação foi uma areia comercial, visto que barragem executadas sobre fundações arenosas costumam apresentar problemas de percolação. O rejeito de britagem utilizado no tapete impermeável de montante foi oriundo do processo de produção do agregado granítico para concreto obtido na zona rural do município de Pocinhos – PB, e cedido pela empresa que produz e comercializa agregados na região. A Tabela 1 apresenta os ensaios realizados para caracterização do solo e do rejeito de britagem, após a passagem do material pela peneira de malha 2,00 mm e 1,18 mm respectivamente.

Tabela 1. Caracterização geotécnica do solo e do rejeito de britagem.

Ensaio	Norma	Propriedades	Resultados Solo	Resultados Rejeito
Distribuição granulométrica dos grãos com defloculante	ABNT NBR 7181/2018	Areia Grossa (%)	0	16,82
		Areia Média (%)	0	38,27
		Areia Fina (%)	100	29,05
		Silte (%)	0	2,64
		Argila (%)	0	13,22
Massa específica dos grãos do solo	ABNT NBR 6458/2016	Peso específico dos grãos do solo (kN/m ³)	26,8	26,9
Compactação (Proctor Normal)	ABNT NBR 7182/2020	Umidade Ótima (%)	-	11,6
		Peso Específico Máx. (kN/m ³)	-	21,5

2.1.2 Cimento Portland

O cimento utilizado foi do tipo Cimento Portland CPV-ARI, devido a sua velocidade das reações de hidratação permitindo assim uma eficiência maior na realização dos ensaios utilizando os MRs, adquirido comercialmente no município de Campina Grande – PB, da marca Nacional. O cimento apresentou peso específico das partículas de 29,99 kN/m³. Esse valor foi determinado através do ensaio de massa específica pelo frasco de Le Chatelier, utilizando-se como base a norma NBR 16605/2017 (SANTANA JUNIOR, 2023).

2.1.3 Recipiente Existente Para os MRs

Leal *et al.* (2024) detalhou o processo construtivo do recipiente utilizado para estudar os modelos reduzidos de barragem no seu estudo. A Figura 1 detalha as medidas do recipiente - o qual teve uma adaptação para saída de água a uma cota de 14cm de altura com relação à sua base - e do corpo da barragem simulada.

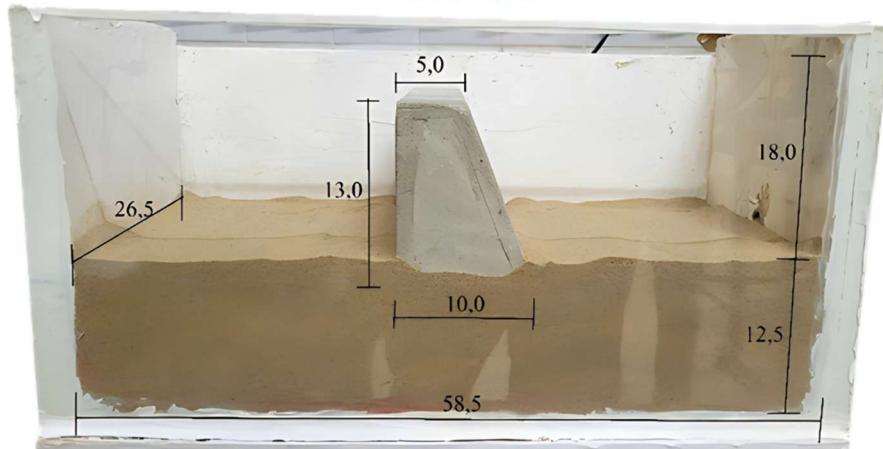


Figura 1. Medidas internas do recipiente e do corpo da barragem (Escala: cm).

2.2 Métodos

2.2.1 Modelos Reduzidos (MRs)

Os ensaios foram realizados para diferentes sistemas de controle de fluxo para a fundação, conforme é apresentado na Figura 2: sendo a primeira simulação realizada sem a utilização de qualquer sistema de controle de percolação (Figura 2(a)); a segunda simulação foi realizada com a utilização do tapete a montante com comprimento de 10 cm (comprimento igual a base da barragem), vide Figura 2(b); e na terceira utilizando o tapete com 20 cm (comprimento igual a duas vezes base da barragem), conforme a Figura 2(c). A execução dos tapetes a montante fora realizada utilizando o rejeito de britagem estabilizado com cimento Portland. A moldagem seguiu os seguintes parâmetros de dosagem: peso específico aparente seco dos grãos de 19 kN/m^3 , teor de cimento de 7,5% e umidade de compactação de 11,6%. A escolha dos parâmetros de dosagem baseou-se no estudo de Souza (2024) o qual realizou o ensaio de compactação na energia Proctor Normal e avaliação de resistência à compressão simples da mistura rejeito de britagem e cimento.

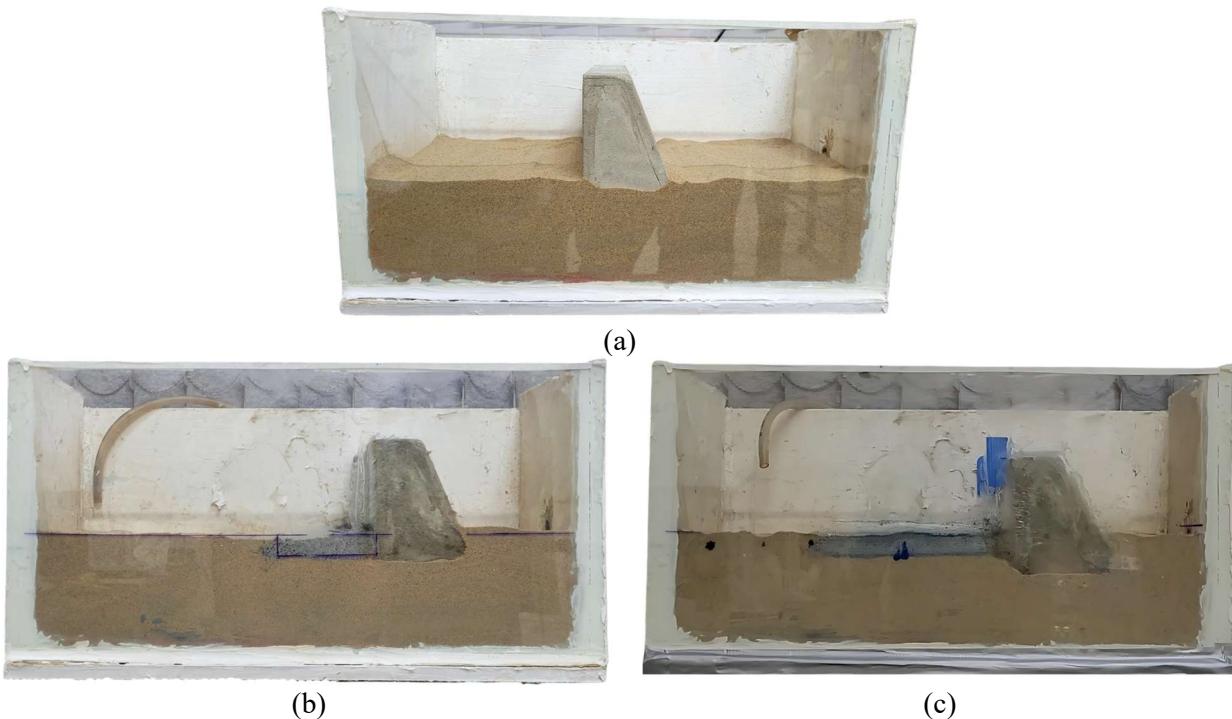


Figura 2. Modelo reduzido (a) Sem sistema de controle de percolação (b) Adição de tapete a montante com comprimento de 10 cm (c) Adição de tapete a montante com comprimento de 20 cm.



2 0 2 5

Para a análise de rede de fluxo nos modelos reduzidos, aplicou-se corante líquido azul em pontos distribuídos de modo a visualizar o fluxo da água em cada simulação. A fim de obter a vazão de percolação, utilizou-se um fluxo constante com 8 cm de coluna de água e, após a saturação do solo, mediu-se a vazão com uma proveta graduada em intervalos de tempo pré-estabelecidos, realizando três repetições para obter resultados representativos.

2.2.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Os mesmos modelos concebidos pelos MRs, foram recriados no software Seep/W utilizando a versão estudante (solução em MEF) para posterior comparação entre os parâmetros obtidos experimentalmente. Nas simulações em MRs foram observadas e registradas as linhas de fluxo e vazões, sendo esta última, obtida na extremidade a jusante do modelo. Como não foi possível realizar ensaios de permeabilidade nos materiais utilizados devido a limitações de equipamento, o coeficiente de permeabilidade (k) para areia foi determinado através da fórmula empírica proposta por Hazen (1911), com um valor de $2,25 \times 10^{-5}$ m/s obtido por Leal *et al.* (2024). Para além disso, o coeficiente de permeabilidade do rejeito de britagem utilizado foi considerado de valor igual ao obtido por Ibeiro (2016) ($k=1,07 \times 10^{-8}$ m/s), o qual estudou uma amostra de solo residual de arenito com resíduos de britagem moldadas com cimento, com características granulométricas e de compactação bastante similares com o obtido por Souza (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Modelos Reduzidos (MRs)

A análise do fluxo em uma barragem sem a utilização de um tapete impermeável exigiu a execução de três tentativas experimentais. As duas primeiras foram comprometidas por intercorrências operacionais que impediram a determinação das vazões. Somente na terceira tentativa, após a aplicação de todas as correções necessárias, foi possível conduzir o ensaio com sucesso e determinar a vazão de saída. Contudo, mesmo com as otimizações realizadas, a ocorrência de erosões e o subsequente colapso do sistema se mantiveram, destacando-se a necessidade de, em contextos similares, projetar um sistema de segurança nas fundações dessas barragens simuladas para garantir a estabilidade da estrutura.

Em contrapartida, a avaliação dos MRs com a inclusão de um tapete impermeável de 10 cm de comprimento foi realizada em uma única tentativa, na qual o sistema demonstrou estabilidade, sem colapsar. Nesse cenário, foi possível uma melhor visualização da rede de fluxo, corroborando com a tendência de eficácia do tapete em reduzir a percolação excessiva e, consequentemente, evitar a erosão da fundação. O aumento do caminho hidráulico proporcionado pelo tapete resultou na diminuição do gradiente hidráulico e na dissipação da carga, reforçando a necessidade de um sistema de segurança para a situação e para o tipo de solo estudado. A mesma sequência executiva foi replicada para um tapete impermeável de 20 cm de comprimento, que também não apresentou colapso, permitindo a determinação da vazão e a visualização completa da rede de fluxo, consolidando ainda mais os resultados positivos da utilização do tapete impermeável.

3.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

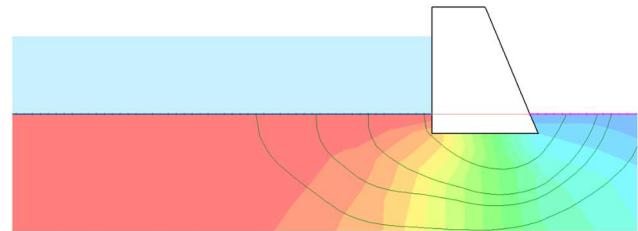
A Figura 3 trata do uso dos MRs e do MEF na avaliação comparativa do comportamento das linhas de fluxo. É possível visualizar que quanto maior for a distância do tapete impermeável, menor será a diferença entre as linhas de fluxo do MR e do MEF, isso provavelmente se deve pelo fato do (k) utilizado do tapete no MEF ter sido estimado e não obtido experimentalmente, demonstrando uma tendência de que a condutividade hidráulica estimada para o tapete tenha sido superior ao seu valor real.



2025



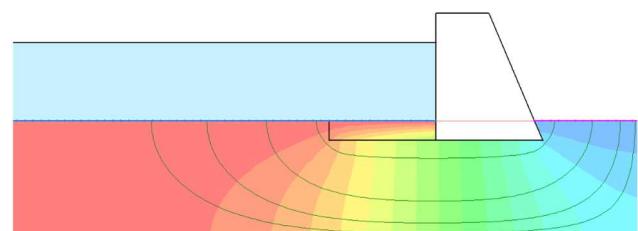
(a)



(b)



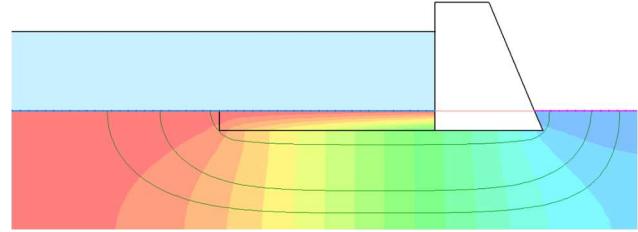
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3. Caminhos de fluxo dos modelos (a) MR - Sem sistema de controle de percolação (b) MEF - Sem sistema de controle de percolação (c) MR - Adição de tapete a montante com comprimento de 10 cm (d) MEF - Adição de tapete a montante com comprimento de 10 cm (e) MR - Adição de tapete a montante com comprimento de 20 cm (f) MEF - Adição de tapete a montante com comprimento de 20 cm.

3.3 Comparação Entre as Análises

Os resultados de vazão obtidas pelos MRs e pelo MEF para cada tipo de simulação estão dispostos na Figura 4.

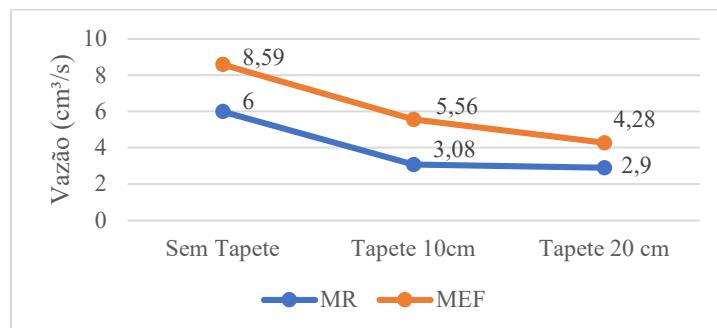


Figura 4. Vazões para cada sistema.



É possível observar através dos gráficos a tendência de redução das vazões com a adição dos sistemas de controle de percolação (tapete a montante). A vazão da fundação, para uma barragem sem sistema de segurança, foi reduzida em 48,67% e em 35,27% com a adição do tapete de 10cm para os MRs e MEF respectivamente. Em contrapartida, ao dobrar o comprimento do tapete, a redução foi pouco expressiva, sendo de 5,84% para os MRs e de 23,00% para o MEF. Ressalta-se que a quantidade restrita de ensaios e, consequentemente, de resultados, impossibilitou a realização de uma análise de calibração ou ajuste em maior escala.

4 CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas através das simulações em MRs e MEF de fluxo na fundação de uma barragem de concreto, ao longo desse trabalho, foi possível concluir que:

- A análise de fluxo com as simulações computacionais (MEF) em comparativo com os MRs, demonstra que há consistência nos dados, visto que, as linhas de fluxo apresentaram uma trajetória semelhante. Porém, é preciso destacar que não foi realizado uma análise de calibração ou ajuste devido a insuficiência de dados, nesse sentido, enfatiza-se a necessidade de estudos futuros com uma maior amplitude e repetibilidade de ensaios.
- A utilização do tapete impermeável a montante de rejeito de britagem estabilizada com cimento se provou eficaz, além de ter evitado o colapso da estrutura, teve um efeito significativo no que tange a vazão de percolação pela fundação de uma barragem, reduzindo quase que pela metade esse valor. Vale destacar que, apesar das simulações terem sido realizadas para MRs e MEF, estas, são válidas também, para casos em escala real. Portanto, os materiais utilizados na execução dos tapetes impermeáveis, podem vir a ser viáveis em uma barragem real, desde que apresente características similares às simuladas.
- As limitações de equipamento para a realização de ensaios de permeabilidade influenciaram na precisão dos resultados numéricos no MEF, uma vez que o coeficiente de permeabilidade (k) foi obtido por correlações empíricas e valores da literatura. Isso destaca a importância da calibração experimental para a validação de modelos computacionais.
- A influência do tamanho do comprimento do tapete impermeável a montante se provou baixa para valores acima do tamanho comprimento da base inferior do corpo da barragem. Portanto, como sugestão, além da utilização dessa tecnologia a montante com um comprimento equivalente ao da base do corpo da barragem, é preciso validar a necessidade da adição de outra solução para barragens em fundação com solos arenosos, a fim de garantir a segurança desses empreendimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, S. L. M. D; Luz, A. B. D. (2009). *Manual de agregados para construção civil*. Rio de Janeiro, CETEM/MCT.
- Assis, A. P.; Hernandez, H. M.; Colmanetti, J. P. (2003). *Apostila de barragens*. Universidade de Brasília, Brasília.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 10004. *Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458. *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181. *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 7182. *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2004). *Design and Construction of Earth and Rock-Fill Dams*. Department of the Army. Washington, DC.



- Hazen, A. (1991). Discussion of ‘Dams on sand foundations’ by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, v. 73, p. 199-203.
- Ibeiro, L. S. (2016). Estudo da distribuição dimensional de poros e da condutividade hidráulica de solos arenosos compactados tratados com cal e cimento. *Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre.
- Krüger, A. J. D; Rosa, D. M. S; Santos, A. A; Silva, W. T. P. (2015). Modelo hidráulico reduzido como instrumento de motivação na aprendizagem da hidráulica. *XXI Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos*, Brasília. p. 1-8.
- Leal, L. S; Silvani. C; Santana Junior. P. R; Lima. A. D. N. (2024). Fluxo em modelo reduzido de barragem de terra: um comparativo entre solução por MEF e Experimental. *XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Eng. Geotécnica*, Balneário Camboriú.
- Lima, A. N. (2019). Otimização da impermeabilidade do núcleo de uma barragem de terra com base no coeficiente η/L_{IV} . *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande.
- Massad, F. (2010). *Obras de terra: curso básico de geotecnia*. 2^a ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Prudêncio, M.L.R.; Coelho, A.H.; Gutstein, D. (1998). Metodologia para obtenção de agregado miúdo artificial a partir do processamento do pó-de-pedra. In: *40º Congresso Brasileiro do Concreto. Rio de Janeiro: Anais*.
- Quintas, F. E. G. (2002). Planejamento da Construção de Barragens de Terra. *Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. [S.I.].
- Santana Junior, P. R. (2023). Influência da umidade na resistência de mistura areia/bentonita estabilizada com cinza de cana-de-açúcar. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande.
- Soleymani, S.; Akhtarpur, A. (2011). Seepage Analysis for Shurijeh Reservoir Dam Using Finite Element Method. In: *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, p.3227-3234. [http://dx.doi.org/10.1061/41165\(397\)330](http://dx.doi.org/10.1061/41165(397)330).
- Souza, C. L. A. (2024). Avaliação da estabilização química de resíduo de pedra britada com adição de cimento para o uso em tijolos de solo-cimento. *Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande.
- Yang, Y; Zhao. T; Jiao. H; Wang. Y; Li. H. (2020). Potential effect of porosity evolution of cemented paste backfill on selective solidification of heavy metal ions. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 3, p. 814.