

Avaliação de Segurança em Barragem de Terra Sob a Condição de *Piping*

Geisa Marques de Aguiar Brandão

Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, geisa.marques@bvp.eng.br

Custódio Junio Reis

Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, custodio.reis@bvp.eng.br

Thiago Borges Gomes Moreira

Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, Brasil, thiago.moreira@bvp.eng.br

RESUMO: As barragens de terra são construções sujeitas a diversas anomalias ao longo de sua vida útil e, caso não tratadas ou controladas, podem resultar em situações de emergência, colocando a estrutura em risco de ruptura. Dessa forma, o controle da percolação no maciço de uma barragem e em sua fundação é crucial para garantir a segurança da estrutura. O presente trabalho parte do contexto da segurança de uma barragem de terra hipotética e da importância dos materiais aplicados em dispositivos de filtros e drenos, bem como materiais de transição que compõem a interface fundação/maciço. Além disso, o estudo também aborda a verificação de segurança em relação ao *piping*, o qual ocorre devido à erosão regressiva. O estudo dedicou-se à análise dos materiais de base de uma estrutura hipotética, com foco em materiais granulares utilizados na construção do tapete drenante horizontal. O objetivo deste trabalho é identificar pontos críticos que demandam maior atenção e avaliar as condições da estrutura, especialmente em relação a possível ruptura hidráulica associada ao *piping*. As análises foram conduzidas considerando as principais diferenças granulométricas dos materiais que constituem o sistema de drenagem e a fundação, destacando a importância do dimensionamento e execução de camadas de transição na região. Nesse sentido, a metodologia empregada para o presente estudo consistiu em análises de percolação com auxílio do *software* Slide 2.0, para identificação do gradiente hidráulico (i) na barragem, um parâmetro crucial na determinação do coeficiente de segurança. Além disso, com base nos resultados dos gradientes hidráulicos, verificou-se que o material granular presente na fundação da barragem não atende aos requisitos de segurança hidráulica na área analisada.

PALAVRAS-CHAVE: *Piping*, Percolação, Gradiente Hidráulico, Fundação, Segurança Hidráulica.

ABSTRACT: Earthen dams are structures subject to various anomalies throughout their lifespan, and if not treated or controlled, these anomalies can lead to emergency situations, placing the structure at risk of rupture. Therefore, controlling seepage within the body of a dam and its foundation is crucial to ensuring the safety of the structure. This study is set in the context of the safety of a hypothetical earthen dam and emphasizes the importance of the materials used in filter and drain devices, as well as transition materials that make up the foundation/body interface. Additionally, the study addresses the verification of safety concerning piping, which occurs due to regressive erosion. The study focused on the analysis of base materials of a hypothetical structure, particularly on granular materials used in the construction of the horizontal drainage blanket. The objective of this work is to identify critical points that require greater attention and assess the conditions of the structure, especially concerning potential hydraulic rupture associated with piping. The analyses were conducted considering the main granulometric differences of the materials that constitute the drainage system and foundation, highlighting the importance of the design and execution of transition layers in the region. In this regard, the methodology employed for this study consisted of seepage analyses with the aid of Slide 2.0 software to identify the hydraulic gradient (i) in the dam, a crucial parameter in determining the safety coefficient. Furthermore, based on the results of the hydraulic gradients, it was found that the granular material present in the foundation of the dam does not meet the hydraulic safety requirements in the analyzed area.

KEYWORDS: *Piping*, Seepage, Hydraulic gradient, Foundation, Hydraulic Safety.

1 INTRODUÇÃO

A importância da segurança das barragens no Brasil durante os anos 2010 ganhou destaque, sobretudo após a ocorrência de grandes desastres ambientais. Um dos problemas cruciais observados nesse cenário foi a erosão interna, também conhecida como *piping*. Esse fenômeno, segundo BERRONES E ACOSTA (2011), é resultado de processos erosivos internos, nos quais partículas de solo migram para aberturas maiores no maciço, formando tubulações internas que facilitam o escoamento de água e o transporte de materiais pelos drenos da barragem. Conforme ressaltado por CRUZ (1996), o controle do fluxo através do maciço, da fundação e das ombreiras é fundamental para garantir a segurança de uma barragem. Diante desses desafios, tornou-se evidente a necessidade de realizar estudos de retroanálise em relação às estruturas. Partindo desse contexto, o presente estudo destaca a importância dos materiais empregados nas áreas de filtros e transição entre a fundação e o maciço em uma hipotética barragem de terra, além de visar verificar a segurança hidráulica em relação ao fenômeno de *piping*, originado pela erosão regressiva. A pesquisa concentrou-se na análise dos materiais de base de uma estrutura hipotética, com ênfase no material granular presente na fundação. A avaliação do potencial de ocorrência de erosão interna e *piping* na fundação é crucial, especialmente em condições desfavoráveis dos materiais na região, visto que a erosão é uma das principais causas de rupturas em barragens. Os materiais granulares desempenham um papel essencial na estabilidade e segurança da barragem, principalmente na prevenção do *piping*.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 *Piping*

De acordo com KOVÁCS (1981), o fenômeno *piping* é uma erosão interna que pode ocorrer gradualmente em terrenos naturais e em barragens de terra, iniciando-se com o transporte de partículas finas pela água, sendo iniciado quando a força de percolação na saída de água supera a resistência de arraste das partículas do solo. Segundo (FUSARO ET. AL, 2017), nos dias atuais, o termo "Erosão Interna" tem sido utilizado para descrever todos os mecanismos que envolvem a remoção de partículas de solo de dentro de estruturas e suas fundações.

O *piping* pode ser desencadeado por uma variedade de fatores, incluindo gradientes hidráulicos elevados, presença de materiais finos suscetíveis à erosão e deficiências no sistema de drenagem da barragem. Tais mecanismos criam túneis internos no maciço da barragem que podem aumentar de tamanho com o tempo, comprometendo a integridade da estrutura. Esse fenômeno pode ocorrer sem que sinais visíveis estejam presentes na superfície da estrutura, tornando-o difícil de detectar e monitorar. O *piping* pode também ser influenciado pelas características granulométricas do solo que compõe a barragem. Quando as condições dos materiais solo base e material de fundação granular não são adequadas, ocorre uma maior desagregação do material coesivo, o que possibilita o arraste de material para o interior do material granular presente na fundação.

2.1.1 *Início do Processo de Piping*

Existem quatro mecanismos pelos quais a erosão interna pode ser iniciada: erosão regressiva, fluxo concentrado, erosão de contato e sufusão. Segundo ICOLD (2017), a erosão de contato acontece quando uma camada de solo composta por partículas maiores está em contato direto com outra camada contendo grãos menores. Nesse processo, o carreamento ocorre na camada de solo com partículas maiores, seguindo paralelamente à interface entre as camadas, como ilustrado na Figura 1.

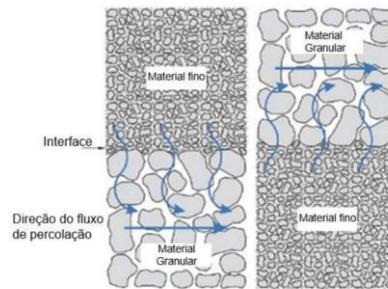


Figura 1. Solo suscetível à erosão de contato (USACE, 2015).

Consequentemente, as partículas de solo fino são deslocadas e transportadas para os poros presentes na camada de solo com partículas maiores.

2.2 Granulometria do Solo

A variabilidade na distribuição do tamanho das partículas do solo tem um impacto direto nas suas propriedades e comportamento, influenciando aspectos como permeabilidade, compactação e resistência. É comum que o transporte de partículas finas possa acontecer onde há fluxo de água do material mais fino para o mais grosso, entretanto, o carregamento em excesso de partículas é considerado uma patologia (SILVA, 2016). Conforme descrito por Ladeira (2007), a graduação do tamanho das partículas em áreas de transição entre materiais com diferentes granulometrias, juntamente com o monitoramento apropriado de parâmetros geotécnicos e o nível de compactação do solo, são fatores cruciais para evitar o fenômeno de piping.

2.3 Segurança de Barragem

Barragens existentes devem ser reavaliadas periodicamente a fim de assegurar que estejam em condições seguras, em conformidade com os padrões de segurança vigentes na data de avaliação. Segundo MENESCAL (2007), No Brasil, já há registros de pelo menos 400 acidentes envolvendo obras hídricas, com mais de 24 mortes entre os anos de 2003 e 2007, devido à ruptura de barragens. Projetos de construção e operação de barragens devem apresentar como principal objetivo a segurança, visto que acidentes em barragens podem acarretar graves desastres, tanto ambientais como também econômicos (SILVA, 2016).

A segurança das barragens abrange um conjunto de medidas preventivas e corretivas que visam proteger não apenas a integridade da estrutura em si, mas também as comunidades e o meio ambiente ao seu redor. Durante a fase de operação, é fundamental manter um rigoroso acompanhamento das condições de segurança da barragem, por meio de inspeções regulares e monitoramento contínuo de parâmetros-chave, como níveis de água, pressões piezométricas e possíveis sinais de deterioração.

ZUFFO (2005) discorre que, a segurança de uma barragem pode ser afetada pela deterioração do corpo da barragem e da fundação. Com o passar do tempo, o maciço da barragem pode se deteriorar devido à idade e, em alguns casos, aumento das poropressões e vazamentos podem se desenvolver. Geralmente, esses processos são lentos e não são prontamente percebidos por meio de um exame de rotina. O monitoramento contínuo da performance da barragem irá assegurar a detecção de qualquer não conformidade seja no projeto ou qualquer problema dentro da barragem que possa causar falha.

2.4 Gradiente Crítico

Conforme indicado pelo ICOLD (2015), é viável interromper a fase de avanço da erosão, considerando as condições hidráulicas, em situações em que o fluxo através do "tubo" formado pelo fluxo concentrado, erosão de contato ou sufusão, sofre uma diminuição de energia devido à dissipação da carga hidráulica nas áreas a montante ou a jusante.

Para calcular o coeficiente de permeabilidade, em 1956, Darcy constatou que a vazão de percolação da água (Q) estava relacionada à área da seção transversal da amostra (A), na direção do fluxo, e à razão $\Delta H/L$,

que expressa o gradiente hidráulico (i) ou a perda de carga por unidade de comprimento. Dessa forma, na equação a seguir, o gradiente hidráulico (i) representa a dissipação da energia ou carga (h) resultante da percolação da água ao longo de uma distância L .

$$Q = KiA \quad (1)$$

$$i = h/L \quad (2)$$

Q = vazão de percolação

K = permeabilidade do material

A = área da seção transversal do escoamento

De acordo com RIBEIRO E ESPÓSITO (2016), quando a carga hidráulica (h) aumenta gradativamente a tensão efetiva diminui até se tornar nula. Nesse ponto, as forças transmitidas de grão para grão se anulam até alcançarem zero. Quando a tensão efetiva é anulada, a resistência do material é completamente perdida, uma vez que a resistência é proporcional à tensão efetiva. Esse estado é denominado liquefação, também conhecido como areia movediça, e o gradiente responsável por isso é chamado de gradiente crítico (i_c), conforme expresso na seguinte fórmula:

$$i_c = \gamma_{sub}/\gamma_w \quad (3)$$

i_c = gradiente crítico

γ_{sub} = peso específico submerso do material

γ_w = peso específico da água

Quando o gradiente hidráulico (i) é alto o suficiente para permitir o carreamento de partículas finas do solo, a água em movimento pode erodir gradualmente o solo ao redor da área de fluxo, criando uma brecha que se alarga à medida que mais partículas de solo são carregadas. Essa erosão regressiva pode progredir de forma significativa, resultando em uma brecha cada vez maior e mais profunda no solo ao redor da estrutura. A medida que a erosão progride, a brecha resultante pode aumentar de tamanho e profundidade, levando eventualmente ao colapso da estrutura.

Ainda, conforme RIBEIRO E ESPÓSITO (2016), quando a redução da resistência começa em um ponto específico, a erosão ocorre nesse local, aumentando ainda mais a concentração de fluxo naquela região. Com o aumento do gradiente hidráulico (i), a erosão também se intensifica e, conseqüentemente, forma-se um canal que se expande gradualmente para o interior do solo, dando origem ao fenômeno *piping*. Portanto, o *piping* ocorre em áreas onde o gradiente hidráulico (i) atinge valores elevados, próximos ao gradiente crítico (i_c), e os níveis de tensão confinante são baixos.

2.4 Critério de Filtro/Drenagem

O critério de retenção é essencial para evitar a migração de materiais do núcleo para o filtro. É necessário determinar uma granulometria que possa reter as partículas mais finas, comuns nas argilas do núcleo, enquanto permite a percolação e controla a propagação de pressões intersticiais elevadas. Ao estabelecer uma granulometria adequada para a barragem, é possível alcançar um equilíbrio entre a retenção de partículas e percolação da água, assegurando a funcionalidade ideal do filtro em diversas condições de operação. A condição que representa esse critério é detalhada a seguir.

$$D_{15}Filtro < 5 * D_{85}Solo - \text{critério de filtro} \quad (4)$$

$$D_{15}Filtro > 5 * D_{15}Solo - \text{critério de drenagem} \quad (5)$$

De acordo com a Equação 4 apresentada acima, o filtro deve ser mais permeável que o solo. Já a Equação 5, o critério de Terzaghi estabelece um limite para o tamanho das partículas finas do filtro, de modo a impedir a passagem dos grãos do solo. Compreende-se que a instalação dos filtros demanda cautela, sendo essencial que os espaços entre as partículas que compõem os mesmos sejam diminuídos para prevenir a migração do solo através deles.

PIMENTA FILHO (2013) enfatiza que, devido às forças de percolação, é fundamental a presença de um solo bem graduado, pois as partículas de tamanho médio podem ser transportadas através do filtro. No entanto, é crucial que o filtro seja adequadamente projetado, uma vez que ele desempenhará o papel de reter as partículas médias em seus vazios, além de capturar as partículas finas.

3 METODOLOGIA

O estudo abrangeu a avaliação da segurança hidráulica de uma barragem de terra hipotética, conforme ilustrado na Figura 1. As análises de percolação, usadas para avaliar o gradiente hidráulico (i), foram conduzidas utilizando o software Slide 2.0 da Rocscience, localizado em Toronto, Canadá, o qual se baseia no Método dos Elementos Finitos.

Inicialmente, foi determinada a seção hipotética da barragem de terra a ser analisada, juntamente com o estabelecimento dos parâmetros geotécnicos e hidráulicos a serem considerados nos cálculos para avaliação da segurança hidráulica da estrutura. Com base nesse modelo definido, foram conduzidas análises de percolação, visando determinar o valor do gradiente hidráulico (i) na interface dos materiais de base em contato com o material granular presente na estrutura, com o objetivo de concluir sobre a segurança hidráulica do barramento.

A Figura 2 apresenta a seção hipotética da barragem em questão, a qual é constituída por um maciço homogêneo. O sistema de drenagem interno é composto por um filtro vertical e um tapete drenante horizontal de areia, uma camada drenante e um dreno de pé em enrocamento (blocos). A fundação é composta por um material granular (camada drenante), solo saprolito e filito. Os parâmetros de resistência e permeabilidade do solos utilizados nas análises são apresentados na Tabela 1.

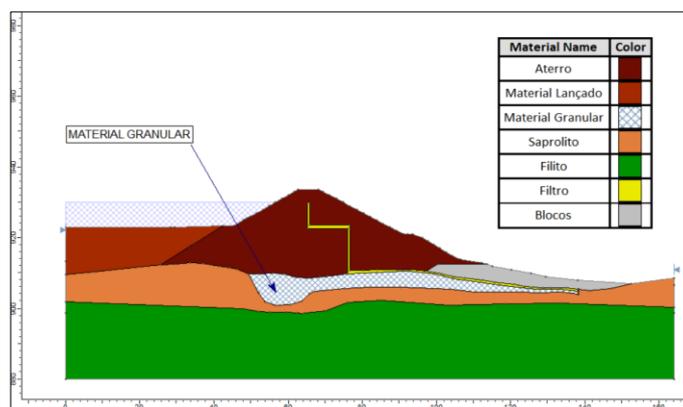


Figura 2. Seção adotada a ser analisada (Slide 2.0).

Tabela 1. Parâmetros de resistência e permeabilidade do solos.

Material	γ (kN/m ³)	c' (KPa)	ϕ' (°)	K_v/K_h	K (cm/s)
Aterro	18.5	2.1	32.3	1	3,29E-06
Material Lançado	19.8	0	25.5	1	3,00E-05
Material Granular	25	0	32	1	6,00E-04
Saprolito	17.9	23.2	29.1	1	1,03E-07
Filito	25	-	-	1	9,50E-08
Filtro	18	0	30	1	1,00E-04
Blocos	20	0	35	1	1,00E-03

Para a análise de transição dos materiais apresentados no gráfico, utilizou-se a Equação 6, com o objetivo de verificar o risco da ocorrência de *piping* na estrutura.

$$D_{15(5)} < 5.D_{85(0,07)} \text{ (critério de drenagem)} \quad (6)$$

De acordo com a Figura 3, fica evidenciado que os materiais analisados não atendem ao critério de não colmatção do material granular.

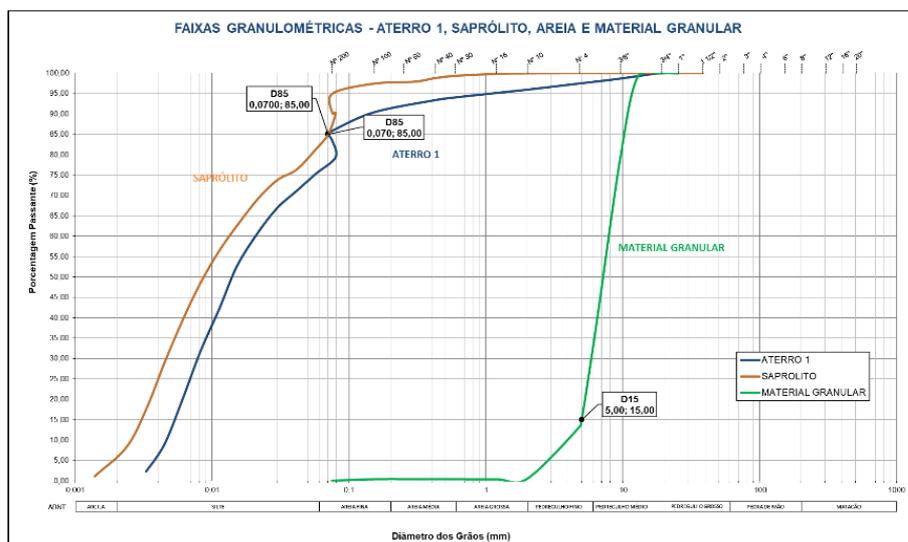


Figura 3. Transições dos materiais que não atendem ao critério de *pipig* (Elaborado pelo Autor).

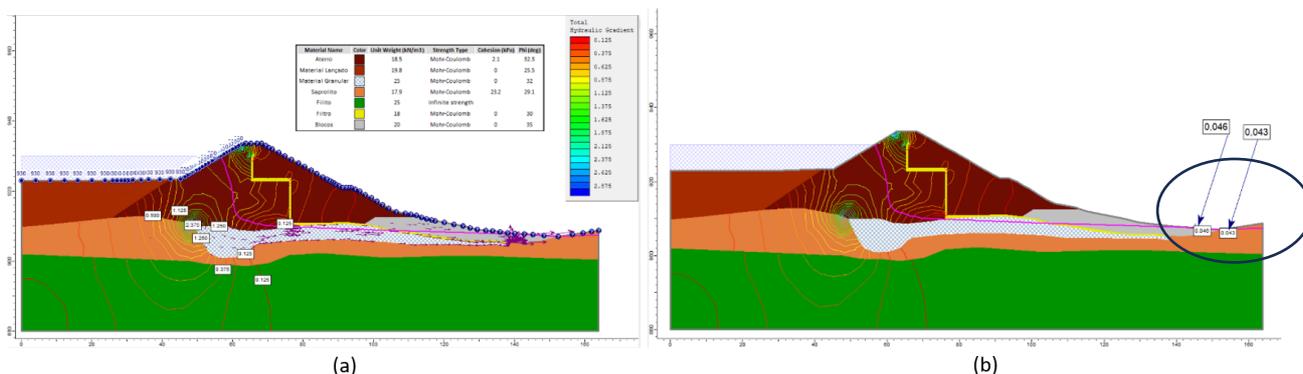


Figura 4. (a) Linhas de fluxo concentradas no interior do material granular e (b) Avaliação do gradiente crítico (i_c) no pé da barragem, a jusante (Slide 2.0).

$$i_c = \gamma_{\text{sub saprólito}} / \gamma_w = (17,9 - 10) / 10 = 0,79 \quad (7)$$

$$i_c = \gamma_{\text{sub aterro}} / \gamma_w = (18,5 - 10) / 10 = 0,85 \quad (8)$$

Com base na análise da Figura 4 (a), observa-se que os resultados revelam elevados gradientes hidráulicos no contato dos solos de base, aterro e saprólito com o material granular predominante na fundação da barragem. Além disso, os valores do gradiente crítico (i_c), conforme expressos nas Equações 7 e 8, corroboram essa observação ao demonstrarem uma proximidade com os gradientes hidráulicos apresentados na Figura 4 (a).

Ainda conforme a Figura 4 (a), é mostrado o caminho preferencial das linhas de fluxo no interior do material granular. De modo geral, dentro de um material granular, as partículas tendem a se mover seguindo caminhos de menor resistência e com mais vazios, formando assim caminhos preferenciais para o fluxo.

A Figura 4 (b) apresenta uma análise do gradiente crítico (i_c) no dreno de pé, localizado a jusante da barragem, onde há ocorrência de fluxo ascendente, indicando uma área de risco.

A partir desses resultados, observa-se que os gradientes hidráulicos são consideravelmente baixos. Em conformidade com RIBEIRO E ESPÓSITO (2016), o fenômeno do *pipig* acontece quando as condições permitem que o gradiente atinja valores críticos. Na Equação 9, é apresentado os cálculos do gradiente crítico (i_c) no dreno de pé.

$$i_c = \gamma_{\text{sub blocos}} / \gamma_w = (20 - 10) / 10 = 1,00 \quad (9)$$

A partir dos resultados expostos, torna-se claro que os gradientes hidráulicos mostrados na Figura 4(b) são inferiores em comparação com os resultados do gradiente crítico (ic) apresentados na Equação 7 e Equação 8. A Figura 6 apresenta um gráfico com a transição dos materiais adequados que poderiam ser aplicados durante a construção da estrutura.

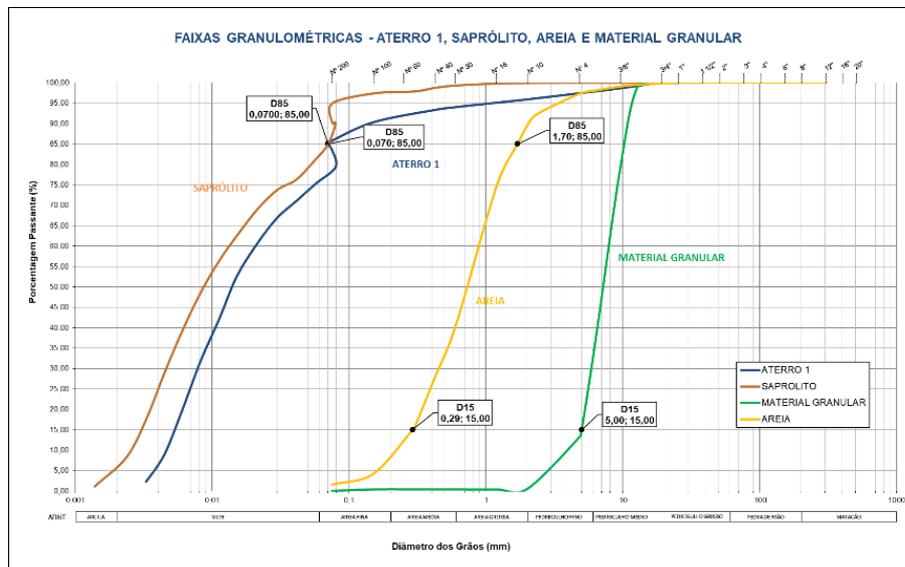


Figura 5. Transições dos materiais que atendem ao critério de *pipig* (Elaborado pelo Autor).

De acordo com a transição apresentada no gráfico da Figura 5 e o cálculo das Equação 9 e Equação 10, fica evidente que os materiais analisados atendem ao critério de não colmatagem do material granular, tanto do Aterro e Saprolito para a areia, quanto da areia para o material granular.

$$D_{15(0,29)} \leq 5 \cdot D_{85(0,07)} \text{ Aterro e Saprolito / Areia (critério de drenagem)} \quad (9)$$

$$D_{15(5)} \leq 5 \cdot D_{85(0,29)} \text{ (critério de drenagem) Areia / Material Granular} \quad (10)$$

A Figura 6 ilustra a esquematização da posição ideal dos materiais que atendem ao critério de *pipig*, conforme apresentados no gráfico da Figura 6.



Figura 6. Esquemática da posição dos materiais que atendem ao critério de *pipig* (Elaborado pelo Autor).

4 CONCLUSÃO

No presente estudo, foi evidenciado que o material encontrado na fundação não é adequado para a região avaliada. A análise realizada entre os materiais de base e o solo granular revelou a ausência de uma transição adequada, aumentando a probabilidade de ocorrência do fenômeno de *pipig* mencionado.

A Figura 4 (b) evidencia que o filtro de areia horizontal desempenha um papel crucial como barreira protetora, impedindo a passagem dos finos potencialmente transportados pela fundação. Com base nos resultados apresentados, é essencial, em uma situação real, verificar a probabilidade desse cenário e confirmar a possível ocorrência dos mecanismos do fenômeno de *pipig* através de análises e evidências adicionais.

O estudo concentrou-se na análise dos materiais de base de uma estrutura hipotética, com foco nos materiais granulares utilizados na fundação. No entanto, na análise do caso hipotético estudado, observou-se que o material granular presente na fundação não atende aos critérios de filtro mencionados, sugerindo a necessidade de implementar uma transição com areia durante a execução do projeto para minimizar os riscos de *piping*, conforme apresentado na Figura 6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berrones, R. F.; Acosta, N. P. L. (2011) Internal erosion due to water flow through earth dams and earth structures. Disponível em: . Acesso em: 10 ago. 2019.
- CRUZ, P. T. (1996) “Permeabilidade e condutividade”, in 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. Oficina de Textos, São Paulo – SP, pp. 258 – 278.
- Fusaro T.C.; Ávila, J. P.; Campello, I. C.; Pimenta filho, M. A. (2017) – Avanços no Entendimento do Risco de Erosão Interna. 20 f. II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito – SGBR. Belo Horizonte.
- ICOLD (2015) – Bulletin 164 – Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundation. Volume I. 142 f.
- ICOLD. Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations, vol. 1. Boletim 164, International Commission On Large Dams (ICOLD). [S.l.]. 2017.
- KOVÁCS, G. Developments in water science. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam. 1981.
- LADEIRA, Josias Eduardo Rossi. (2007). Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos: O Caso UHE-São Simão. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte
- MENESCAL, R. A. Risco e Segurança em Engenharia – Problemas Enfrentados pelo Ministério da Integração com Obras de Infraestrutura Hídrica. Debate: O Momento Atual da Engenharia Brasileira. Instituto de Engenharia. São Paulo, 7 mar. 2007.
- Massad, F. (2010) Obras de terra: curso básico de geotecnia, 2 ed. Oficina de Textos, São Paulo, 216 p.
- CARNEIRO, Helton França. Erosões internas no aterro da barragem Granjeiro: estudo de caso. 2021.
- PIMENTA FILHO, Marcos de Ávila. Análise da erosão interna de solos em barragens com base na distribuição de vãos. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.
- RIBEIRO, Sandra Mara; ESPÓSITO, Terezinha. Avaliação de Segurança de Barragens: Piping como Critério para Elaboração de Carta de Segurança. **Belo Horizonte**, 2016.
- SILVA, Dayana S. Estudo de filtro aplicado ao controle de erosão interna em barragens. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. 2016.
- USACE. Best Practices in Dam And Levee Safety Risk Analysis. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation e U.S. Army Corps of Engineers. [S.l.]. 2015.
- ZUFFO, M. S. R. Metodologia para avaliação da segurança de barragens. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP, 2005.