*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/COBRAMSEG2026.1/23**

# Avaliação dos Gradientes Hidráulicos e da Segurança Hidráulica em Barragens de Terra sob Diferentes Tratamentos de Fundação

Amanda Fetzer Visintin
Mestre em Engenharia Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, amanda.visintin@solution-ipd.com

Beatriz Wos Prates
Engenheira Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, beatrizwos@solution-ipd.com

Diogo Larocca Cestari
Engenheiro Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, diogocestari@solution-ipd.com

Jacqueline Cristina Patzsch
Mestre em Engenharia Civil, Solution-IPD, Curitiba, Brasil, jacpatzsch@solution-ipd.com

Vítor Pereira Faro
Doutor em Engenharia Civil, Solution IPD, Curitiba, Brasil, vpfaro@ufpr.br

RESUMO: A segurança hidráulica de barragens de terra está vinculada à distribuição dos gradientes hidráulicos na fundação e ao potencial de instabilidade associado à redução das tensões efetivas, como a liquefação hidráulica na região de saída do fluxo. Este estudo compara a eficiência de diferentes tratamentos de fundação na redução desses gradientes por meio de modelagem numérica bidimensional de fluxo permanente pelo método dos elementos finitos, no software Slide2. Foi considerada uma barragem homogênea de 40 m de altura, apoiada sobre fundação estratificada, sob quatro cenários: sem tratamento, tapete impermeável a montante, cut-off central com 75% de interceptação da camada permeável e cut-off central com interceptação total. Para cada cenário, variou-se a permeabilidade da camada superior da fundação entre $10^{-3}$, $10^{-4}$ e $10^{-5}$ m/s. Os resultados mostraram que a permeabilidade da fundação exerce influência secundária no comportamento global, enquanto a geometria e o tipo de tratamento governam a redistribuição dos gradientes. Entre as alternativas avaliadas, o cut-off total apresentou o melhor desempenho, com maior redução dos gradientes hidráulicos e aumento do fator de segurança em relação ao gradiente crítico, configurando a solução mais eficiente para o controle da percolação.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de terra; percolação; gradiente hidráulico; liquefação hidráulica; modelagem numérica.

ABSTRACT: The hydraulic safety of earth dams is directly related to the distribution of hydraulic gradients within the foundation and to the risk of instability phenomena associated with reduced effective stresses, such as hydraulic liquefaction in the seepage exit zone. This study compares the efficiency of different foundation treatment solutions in reducing hydraulic gradients through two-dimensional finite element modeling of steady-state seepage using Slide2 software. A 40 m high homogeneous dam founded on a stratified foundation was analyzed under four scenarios: (i) untreated condition; (ii) upstream impermeable blanket; (iii) central cut-off wall with a depth corresponding to 75% of the permeable layer thickness; and (iv) central cut-off wall fully penetrating the permeable layer. In all scenarios, the permeability of the upper foundation layer was varied as $10^{-3}$, $10^{-4}$, and $10^{-5}$ m/s. The results were evaluated based on the flow net, equipotential distribution, and maximum hydraulic gradient at the exit region, and the factor of safety relative to the critical gradient associated with hydraulic liquefaction was calculated. The results indicate that, within the analyzed range, foundation permeability has a secondary influence on gradient redistribution, whereas the behavior is governed primarily by geometry and by the type of treatment adopted. Among the evaluated solutions, the full-depth cut-off showed the highest efficiency in reducing hydraulic gradients and increasing the factor of safety, representing a limiting condition for seepage control.

KEYWORDS: Earth dams; seepage; hydraulic gradient; hydraulic heave; numerical modeling.

## 1 INTRODUÇÃO

Barragens de terra e enrocamento são amplamente empregadas em obras hidráulicas pela disponibilidade de materiais naturais e pela viabilidade econômica (GAIOTO, 2003). Entretanto, a segurança dessas estruturas está sujeita a diferentes mecanismos de instabilidade, como galgamento, instabilidade de taludes, erosão interna, piping, surgência, levantamento hidráulico e liquefação hidráulica. Em barragens de terra, os mecanismos associados à percolação no maciço e na fundação apresentam relevância particular, estando relacionados a parcela significativa dos registros de rupturas e acidentes (FOSTER; FELL; SPANNAGLE, 2000).

Para o controle da percolação na fundação, podem ser adotados tratamentos destinados à redução dos gradientes hidráulicos e à restrição do fluxo de água, como trincheiras de vedação (cut-offs), cortinas de injeção e tapetes impermeáveis a montante (ANA, 2016; GAIOTO, 2003; ICOLD, 2011). Embora estudos recentes tenham avaliado o desempenho dessas soluções por modelagem numérica, especialmente no Brasil (CALAÇA, 2025; DOMINGOS, 2025), ainda são limitadas as análises sistemáticas que consideram a variação da permeabilidade da fundação. Nesse contexto, este trabalho avalia, por meio de modelagem bidimensional em regime permanente pelo método dos elementos finitos, a influência de diferentes tratamentos de fundação na redução dos gradientes hidráulicos associados à liquefação hidráulica por fluxo ascendente.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de fluxo é fundamental para a determinação da linha freática e da distribuição de poropressões, elementos que influenciam a estabilidade dos taludes e a ocorrência de mecanismos de ruptura, como erosão interna, piping e liquefação (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996).

Em meios porosos saturados, a percolação é governada pelo diferencial de carga hidráulica, sendo classicamente representada por redes de fluxo compostas por linhas de corrente e equipotenciais (CASAGRANDE, 1937; HARR, 1962). O gradiente hidráulico, que corresponde à variação dessa carga por unidade de comprimento, traduz a força de percolação atuante na massa de solo ao longo do escoamento (HARR, 1962). Na análise de barragens de terra, a distribuição desses gradientes permite identificar as regiões de maior solicitação hidráulica, tipicamente concentradas no pé de jusante, onde convergem as linhas de percolação do maciço e da fundação.

Tradicionalmente, a análise de fluxo em barragens de terra baseava-se em métodos analíticos e redes de fluxo, porém com limitações para geometrias complexas e fundações heterogêneas. Com o avanço computacional, o método dos elementos finitos passou a ser amplamente utilizado por permitir simulações mais realistas, incluindo anisotropia e variações do nível do reservatório. (ZIENKIEWICZ et al., 2005).

A liquefação hidráulica, frequentemente associada à condição de areia movediça, ocorre quando o fluxo ascendente da água reduz as tensões efetivas do solo a valores nulos ou próximos de zero (TERZAGHI; PECK; MESRI, 1996). Essa perda de resistência decorre da eliminação do confinamento efetivo entre as partículas, inviabilizando a transmissão de esforços intergranulares. No cenário de barragens de terra, onde esse fluxo verticalizado costuma se concentrar nas zonas de saída a jusante, a segurança contra a liquefação hidráulica pode ser avaliada de maneira prática pela comparação entre o gradiente hidráulico crítico e o gradiente atuante.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Ferramenta Numérica e Tipo de Análise

A análise de percolação foi realizada por meio do programa Slide-2, desenvolvido pela RocScience. Foi adotada análise bidimensional em regime permanente (steady-state), utilizando o método dos elementos finitos (Finite Element Analysis – FEA). A formulação considera escoamento saturado governado pela equação de Laplace para meios porosos. O modelo foi considerado bidimensional (condição de plane strain), isotrópico (kx = ky) e com linha freática livre, determinada automaticamente pelo solver do programa.

### 3.2 Geometria do Modelo

Foi modelada uma barragem de terra homogênea com altura total de 40 m, nível máximo normal (NMN) na cota 37 m e borda livre de 3 m. O talude de montante e o de jusante foram adotados com inclinação 2H:1V, e a largura de crista considerada foi de 6 m, a confirmar em etapa posterior de detalhamento. A fundação foi representada por duas camadas horizontais, sendo a superior permeável, com 20 m de espessura, sobre uma camada inferior de menor permeabilidade, caracterizada por baixa condutividade hidráulica. Para reduzir efeitos de borda e permitir uma melhor representação do campo de fluxo, o domínio lateral foi estendido com comprimento adicional equivalente ao da barragem, tanto a montante quanto a jusante.

### 3.3 Propriedades Hidráulicas

Foram adotados coeficientes de permeabilidade de $k = 1 \times 10^{-7}$ m/s para o maciço da barragem e $k = 1 \times 10^{-8}$ m/s para a fundação inferior. Para a fundação superior, considerada variável nas análises, foram avaliados os valores de $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s, $1 \times 10^{-4}$ m/s e $1 \times 10^{-5}$ m/s. O maciço foi modelado como homogêneo, assim como os elementos de tratamento (cut-off e tapete impermeável), que foram adotados com permeabilidade igual a $k = 1 \times 10^{-7}$ m/s.

### 3.4 Condições de Contorno e Discretização Numérica

Foram adotadas como condições de contorno carga hidráulica total correspondente à cota de 37 m a montante e drenagem total a jusante, com pressão neutra nula na superfície de saída. A linha freática foi determinada automaticamente pelo solver. O domínio foi discretizado em uma malha homogênea de elementos finitos, com cerca de 2.500 nós e elementos quadrilaterais de quatro nós, com tamanho médio de aproximadamente 0,5 m, após verificações preliminares indicarem maior estabilidade dos resultados em relação a malhas mais grosseiras. A malha foi mantida constante em todas as simulações para garantir a comparabilidade dos cenários. A Figura 1 apresenta as condições de contorno e a discretização da malha adotada.

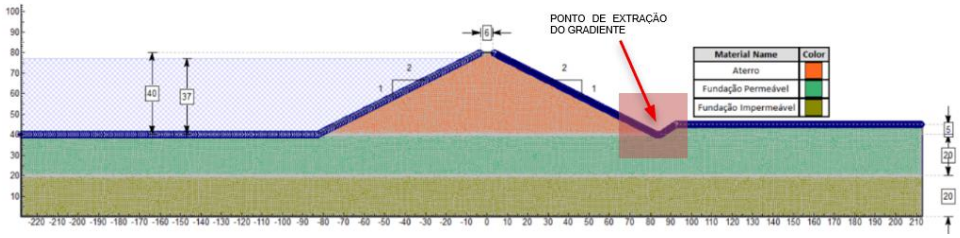



Figura 1. Condições de contorno e discretização da malha

### 3.5 Cenários Avaliados

A Figura 2 a Figura 5 apresenta a seção tipo adotado para cada caso estudado.

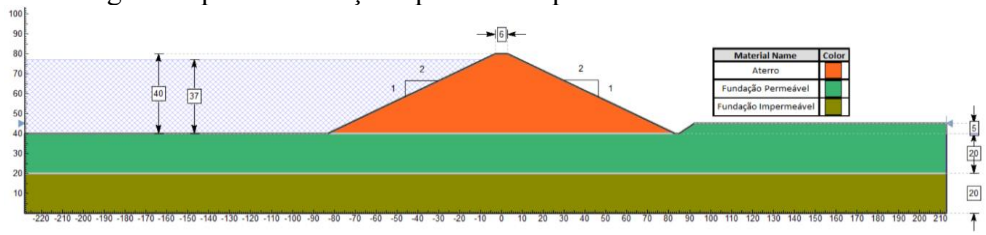



Figura 2. Geometria da barragem sem tratamento (Caso 1)

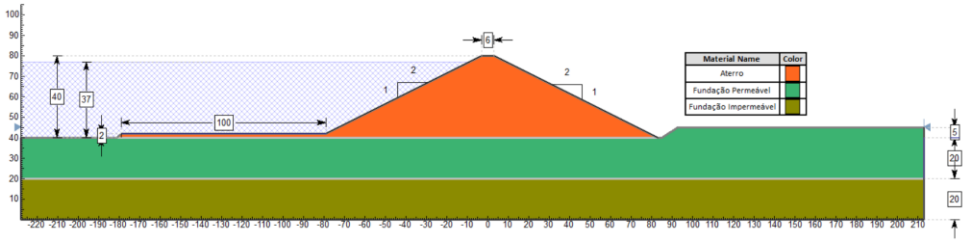



Figura 3. Geometria da barragem com tapete impermeável de montante (Caso 2)

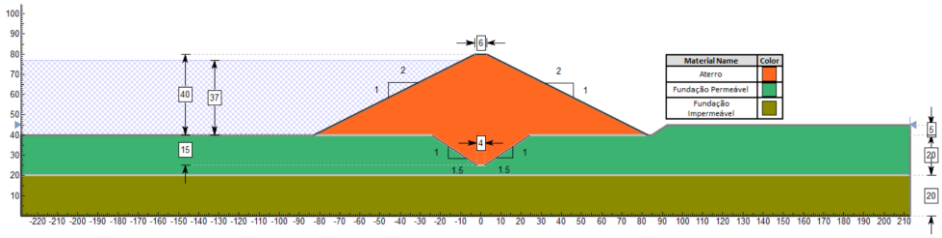



Figura 4. Geometria da barragem com cut-off parcial (75%) posicionada no eixo da estrutura

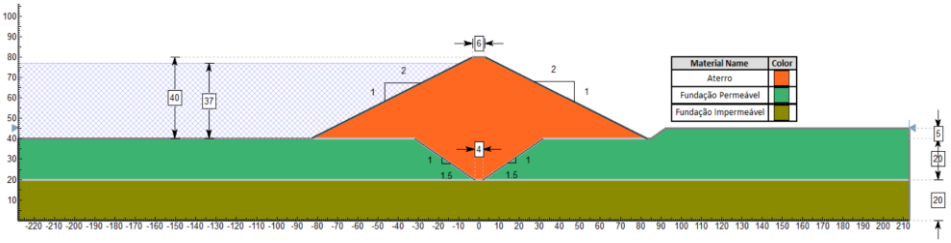



Figura 5. Geometria da barragem com cut-off total (100%) posicionada no eixo da estrutura

Os cenários analisados, assim como as principais características físicas, podem ser observados no Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição de cenários avaliados

| Referência | Solução 1 | Solução 2 | Solução 3 |
|---|---|---|---|
| **Barragem Sem Tratamento** | **Tapete Impermeável de Montante** | **Cut-Off parcial (75%) posicionada no eixo da estrutura** | **Cut-Off total (100%) posicionada a montante do eixo da estrutura** |
| Modelo base sem qualquer intervenção na fundação; | Comprimento de 30 m e espessura de 2 m; | Profundidade de 15 m, base de 4 m e inclinação da escavação de 1,5H:1V; | Profundidade de 20 m, base de 4 m e inclinação da escavação de 1,5H:1V; |

### 3.6 Critério de Avaliação

O parâmetro adotado para avaliação da estabilidade hidráulica foi o gradiente hidráulico vertical máximo na saída da fundação, associado ao fluxo ascendente. O gradiente crítico foi estimado por:

$$i_{crítico} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \quad (1)$$

Onde:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

E adotando peso específico saturado do solo da fundação igual a $\gamma_{sat} = 20\ kN/m^3$ e $\gamma_w = 10\ kN/m^3$, obtem-se um $i_{crítico}$ de 1,0.

O fator de segurança contra liquefação hidráulica foi definido como a relação entre o gradiente crítico e o gradiente máximo.

Para comparar as diferentes soluções de tratamento de fundação, os resultados das análises numéricas foram sintetizados em gráficos de barras representando os fatores de segurança associados ao gradiente hidráulico em cada cenário. Foram consideradas quatro configurações: condição sem tratamento, tapete impermeável a montante, cut-off parcial (1) e cut-off total (2). Para cada configuração, analisaram-se três valores de permeabilidade da camada superior da fundação (k = $1{,}0\times10^{-3}$, $1{,}0\times10^{-4}$ e $1{,}0\times10^{-5}$ m/s), mantendo-se constantes as demais propriedades hidráulicas do modelo.

A utilização de gráficos de barras permitiu visualizar simultaneamente o desempenho relativo de cada solução de tratamento e sua sensibilidade à variação da permeabilidade da fundação, bem como quantificar o ganho de segurança em relação à condição sem tratamento.

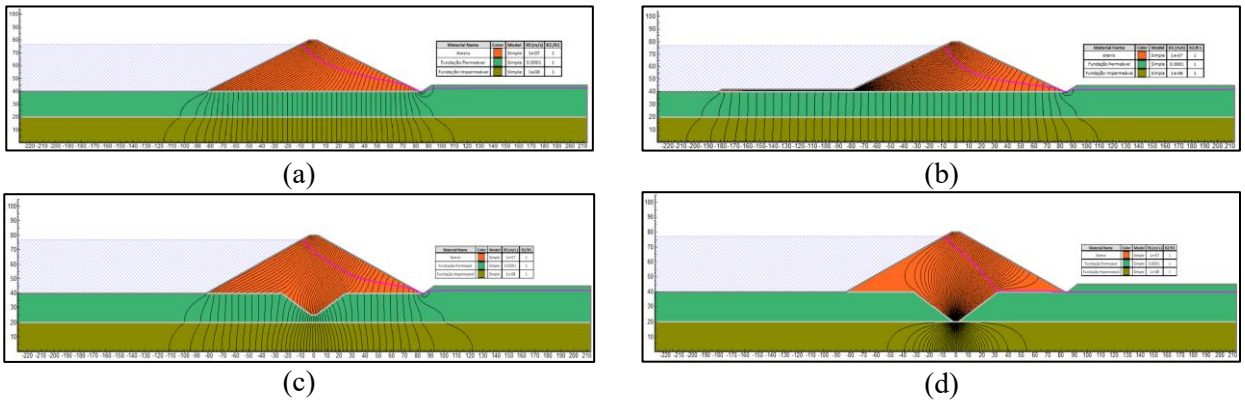
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise qualitativa do regime de fluxo

Inicialmente, analisou-se o regime de fluxo obtido nas simulações numéricas por meio da interpretação das redes de fluxo e das linhas equipotenciais geradas para cada cenário considerado. Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas a distribuição das equipotenciais para a condição sem tratamento e para as soluções de controle analisadas, tapete impermeável a montante, cut-off parcial (1) e cut-off total (2) posicionado no eixo da barragem, considerando diferentes valores de permeabilidade da camada superior da fundação. A análise dessas redes permite avaliar qualitativamente as alterações no percurso de percolação, no comprimento do caminho hidráulico e na distribuição das perdas de carga ao longo da fundação.

| Material Name | Color | Model | KS (m/s) | K2 /K1 |
|---|---|---|---|---|
| Aterro | | Simple | 1e-07 | 1 |
| Fundação Permeável | | Simple | 0.0001 | 1 |
| Fundação Impermeável | | Simple | 1e-08 | 1 |

Figura 6. Legenda dos valores de permeabilidade adotados



(a) (b) (c) (d)

Figura 7. Rede de fluxo e linhas equipotenciais da barragem para k = $1{,}0\times10^{-4}$ m/s : (a) sem tratamento; (b) tapete impermeável; (c) Cut-off parcial (1) no eixo; (d) Cut-off total (2) no eixo

A análise das redes de fluxo indica que, no cut-off total (2), as linhas equipotenciais se concentram na trincheira, evidenciando dissipação de carga localizada e redução quase completa do fluxo na fundação. No tapete impermeável, as equipotenciais se distribuem a montante, refletindo dissipação mais uniforme ao longo do percurso de percolação. O cut-off parcial (1) apresenta comportamento intermediário, com concentração incipiente na trincheira e manutenção de fluxo na fundação.

### 4.2 Gradientes hidráulicos máximos

A partir da interpretação qualitativa do regime de fluxo apresentada anteriormente, procedeu-se à análise quantitativa dos gradientes hidráulicos máximos obtidos nas simulações numéricas. Essa etapa teve como objetivo avaliar comparativamente o desempenho das diferentes soluções de tratamento de fundação em termos de controle da percolação e redução dos gradientes hidráulicos críticos na região do pé de jusante da barragem. Os resultados obtidos são apresentados por meio de representações gráficas e tabelas comparativas, permitindo avaliar simultaneamente a influência da permeabilidade da fundação e a eficiência relativa das diferentes soluções de tratamento. A Tabela 2 apresenta os gradientes hidráulicos máximos e os fatores de segurança correspondentes para todos os cenários analisados, enquanto a Figura 9, Figura 10 e Figura 11 ilustram a distribuição espacial dos gradientes hidráulicos obtidos nas simulações, com destaque para a região do pé de jusante, onde se concentram as condições potencialmente mais críticas para ocorrência de liquefação hidráulica.

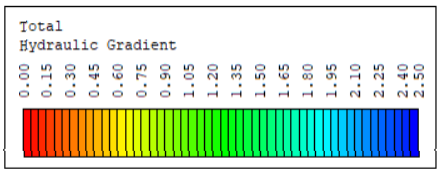



Figura 8. Legenda de referência para valores de gradiente hidráulico

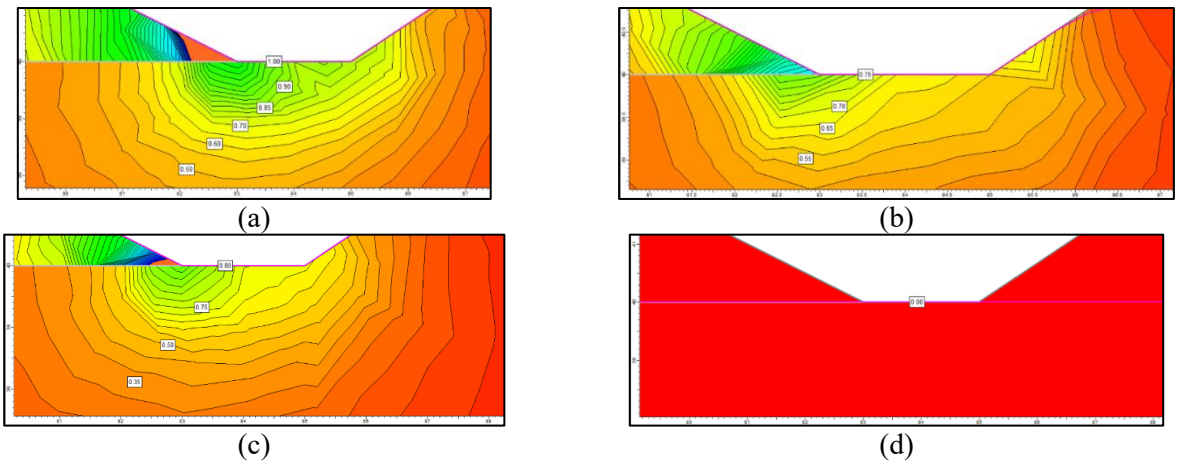



Figura 9. Gradientes hidráulicos totais para k = 1,0×10⁻³ m/s: (a) sem tratamento; (b) tapete impermeável; (c) Cut-off parcial (1) no eixo; (d) Cut-off total (2) no eixo

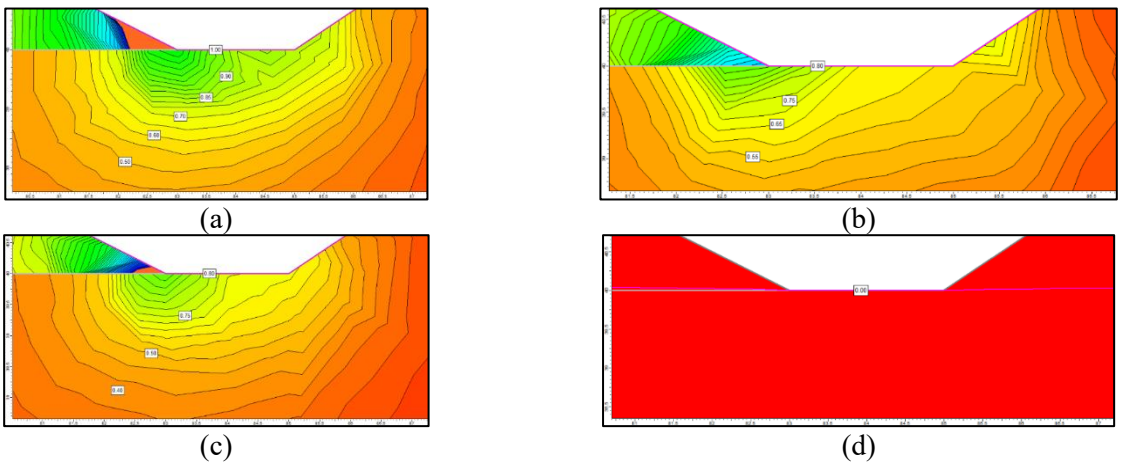



Figura 10. Gradientes hidráulicos totais para k = 1,0×10⁻⁴ m/s: (a) sem tratamento; (b) tapete impermeável; (c) Cut-off parcial (1) no eixo; (d) Cut-off total (2) no eixo

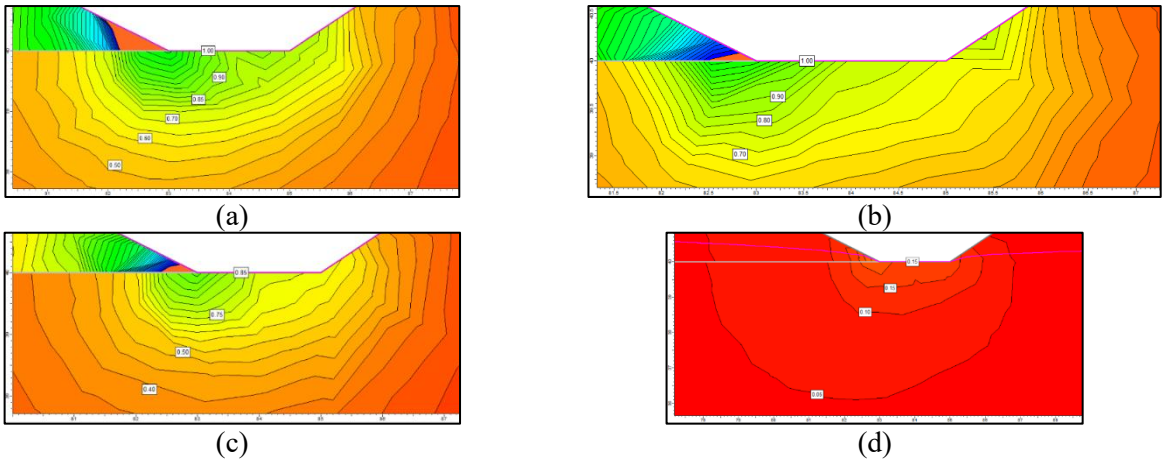


Figura 11. Gradientes hidráulicos totais para k = 1,0×10$^{-5}$ m/s: (a) sem tratamento; (b) tapete impermeável; (c) Cut-off parcial (1) no eixo; (d) Cut-off total (2) no eixo

Tabela 2. Gradientes hidráulicos máximos e fatores de segurança de diferentes cenários analisados

| Caso | k da fundação (m/s) | Gradiente máximo ($i_{max}$) | Gradiente crítico ($i_{crít}$) | Fator de Segurança (FS) |
|---|---|---|---|---|
| Sem Tratamento | 1×10$^{-3}$ | 1,000 | 1,000 | 1,00 |
| | 1×10$^{-4}$ | 1,000 | 1,000 | 1,00 |
| | 1×10$^{-5}$ | 1,000 | 1,000 | 1,00 |
| Tapete | 1×10$^{-3}$ | 0,750 | 1,000 | 1,33 |
| | 1×10$^{-4}$ | 0,800 | 1,000 | 1,25 |
| | 1×10$^{-5}$ | 1,000 | 1,000 | 1,00 |
| Cut-off Parcial (1) | 1×10$^{-3}$ | 0,800 | 1,000 | 1,25 |
| | 1×10$^{-4}$ | 0,800 | 1,000 | 1,25 |
| | 1×10$^{-5}$ | 0,850 | 1,000 | 1,18 |
| Cut-off Total (2) | 1×10$^{-3}$ | 0,000 | 1,000 | >10 (1) |
| | 1×10$^{-4}$ | 0,000 | 1,000 | >10 (1) |
| | 1×10$^{-5}$ | 0,150 | 1,000 | 6,67 |

(1) Gradientes desprezíveis no ponto analisado devido à redistribuição do fluxo no domínio

Os resultados evidenciam diferenças expressivas no desempenho hidráulico das soluções de tratamento analisadas. Na condição sem tratamento, o gradiente hidráulico máximo permanece unitário ($i_{max}$ = 1,00) para todas as permeabilidades, com fator de segurança igual a 1,00, caracterizando uma condição crítica de estabilidade hidráulica. Nesse cenário, a resposta do sistema é controlada predominantemente pelas condições geométricas e de contorno, sem ganho de segurança associado à variação de k.

O tapete impermeável apresenta desempenho limitado e fortemente dependente da permeabilidade da fundação. Observa-se incremento do fator de segurança apenas para a maior permeabilidade analisada, com FS = 1,33 para k = 1×10$^{-3}$ m/s, sua eficiência decresce progressivamente com a redução de k, aproximando-se da condição sem tratamento e atingindo FS = 1,00 para k = 1×10$^{-5}$ m/s. Esse comportamento indica que sua atuação está associada ao alongamento do percurso de percolação, mecanismo mais eficiente em meios mais permeáveis e menos relevante em solos de baixa permeabilidade.

O cut-off parcial (1) apresenta redução consistente dos gradientes hidráulicos em todos os cenários, com $i_{max}$ entre 0,75 e 0,80 e FS variando de 1,18 a 1,25. Embora ainda permita percolação através da fundação, sua função como barreira ao fluxo se mostra mais eficiente e menos sensível às variações de permeabilidade quando comparada ao tapete impermeável.

O cut-off total (2) registra o melhor desempenho global. Para k = 1×10$^{-3}$ e 1×10$^{-4}$ m/s, os gradientes tornam-se desprezíveis, resultando em FS superiores a 10. Ressalta-se, entretanto, que esses valores representam a condição local avaliada e decorrem da redistribuição das linhas de fluxo promovida pela

interceptação completa da camada permeável, não devendo ser interpretados como ausência de fluxo ou de gradientes em toda a fundação. Para $k = 1\times10^{-5}$ m/s, ainda se observa elevado nível de segurança, com $i_{max}$ = 0,15 e FS = 6,67. Esses resultados indicam interceptação mais efetiva das linhas de fluxo e concentração da dissipação de carga na região do corte, reduzindo de forma expressiva os gradientes na região de saída da fundação.

Em síntese, o desempenho das medidas de tratamento é governado por seu mecanismo de atuação: o tapete impermeável reduz a percolação por aumento do comprimento do caminho de fluxo, enquanto os cut-offs restringem diretamente o escoamento. Entre as alternativas avaliadas, o cut-off total se destaca como a solução mais eficiente para o controle hidráulico da fundação.

## 5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o desempenho das soluções de tratamento depende do mecanismo de atuação e da permeabilidade da fundação. O tapete impermeável apresenta eficiência limitada e dependente de k, enquanto o cut-off parcial (1) promove melhoria consistente, ainda com percolação. O cut-off total (2) apresenta o melhor desempenho, com redução significativa dos gradientes e elevados fatores de segurança. Entretanto, esses resultados estão associados às hipóteses adotadas na modelagem, sendo esperadas alterações em função da discretização da malha, da anisotropia hidráulica, da posição do cut-off e das propriedades hidráulicas dos materiais de tratamento.

Assim, soluções que interceptam diretamente as linhas de fluxo mostram-se mais eficazes para o controle de percolação, sendo o cut-off total a alternativa mais robusta para garantir a estabilidade hidráulica da fundação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas – ANA (2016) *Diretrizes para elaboração de projetos de barragens*. Agência Nacional de Águas, Brasília, DF, Brasil, 160 p.

Calaça, J. P. S. (2025) *Análise do comportamento da percolação em barragens de terra utilizando modelagem numérica*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.

Casagrande, A. (1937) Seepage through dams. *Journal of the New England Water Works Association*, Boston, v. 51, n. 2, p. 131–172.

Domingos, G. (2025) *Análise da aplicação de geomembrana em barragens de terra como solução para controle de percolação*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil.

Duncan, J. M., Wright, S. G., Brandon, T. L. (2014) *Soil strength and slope stability*. 2nd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 317 p.

Foster, M. A., Fell, R., Spannagle, M. (2000) The statistics of embankment dam failures. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 37, n. 5, p. 1000–1024.

Gaioto, N. (2003) *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil, 126 p.

Harr, M. E. (1962) *Groundwater and seepage*. McGraw-Hill, New York, NY, USA, 315 p.

International Commission on Large Dams – ICOLD (2011) *Small dams: design, surveillance and rehabilitation*. Bulletin 157, Paris, France.

Terzaghi, K., Peck, R. B., Mesri, G. (1996) *Soil mechanics in engineering practice*. 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 549 p.

Youd, T. L. et al. (2001) Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998

Zienkiewicz, O. C. et al. (2005) *The finite element method: its basis and fundamentals*. 6th ed., Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 631 p.