



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



JOÃO PEDRO BORGES DOMINGOS

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANA COMO TRATAMENTO DE
FUNDAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA**

OURO PRETO
AGOSTO/2025

JOÃO PEDRO BORGES DOMINGOS

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANA COMO TRATAMENTO DE
FUNDAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA**

JOÃO PEDRO BORGES DOMINGOS

Trabalho Final de Curso apresentado como
parte dos requisitos para obtenção do Grau de
Engenheiro Civil na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Área de concentração: Geotecnia

Orientadora: Prof^ª. Dr. Felipe de Campos Loch

OURO PRETO

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D671a Domingos, Joao Pedro Borges.

Análise da aplicação de geomembrana como tratamento de
fundação em barragens de terra. [manuscrito] / Joao Pedro Borges
Domingos. - 2025.

76 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Barragens de terra. 2. Percolação. 3. Geomembranas. 4. Valas -
Trincheira de vedação. I. Loch, Felipe de Campos. II. Universidade Federal
de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Pedro Borges Domingos

Análise da aplicação de geomembrana como tratamento de fundação em barragens de terra

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro civil

Aprovada em 01 de setembro de 2025

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.a Marinis Maria de Almeida Guerra - (Samarco Mineração)
Eng.a Ariane Braga Fachinetti Lopes - (Pimenta d'Ávila)

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/09/2025



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch**, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR, em 02/09/2025, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0971368** e o código CRC **D27401DB**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, pelas oportunidades e por me sustentar em cada etapa desta jornada.

Aos meus pais, Maria de Lourdes Borges e Marcos Antônio Domingos, por todo amor, exemplo e apoio incondicional – este trabalho também é de vocês.

À minha irmã, Maria Eduarda Borges, pela companhia diária, palavras de incentivo e compreensão nos momentos de ausência.

À minha namorada, Isabella, pela paciência, pela confiança no meu potencial e por celebrar cada pequena conquista comigo.

Aos amigos e à família em geral, pelo encorajamento constante, pelas conversas que aliviaram a pressão e pela torcida de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, pela orientação segura, pela disponibilidade e pelas contribuições técnicas que foram essenciais para a construção deste estudo.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse possível, o meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho avalia a viabilidade do uso de geossintéticos na fundação de barragens de terra para mitigar percolação, combinando revisão bibliográfica e estudo de caso com modelagem numérica no Slide 6.0. Considerou-se uma barragem homogênea de argila compactada e seis cenários: referência sem tratamento; geomembrana a montante com extensões de 30, 45, 60 e 75 m; e trincheira de vedação interceptando a camada mais permeável. A geomembrana, ao alongar os caminhos de fluxo, reduziu pressões neutras e gradientes, refletindo-se em decréscimos de vazão de 16,27% (30 m), 46,3% (45 m), 66,83% (60 m) e 69,82% (75 m) frente ao caso de referência; o ganho marginal no último incremento decorreu da permanência de uma camada superficial de alta permeabilidade. O *cut-off* apresentou desempenho hidráulico superior, alcançando redução de 89,3% da vazão percolada. Conclui-se que ambas as soluções são tecnicamente viáveis: a geomembrana é atrativa quando corretamente dimensionada e instalada, oferecendo controle efetivo de percolação com boa relação custo-benefício; já a trincheira de vedação tende a ser mais eficiente em fundações com formações altamente condutivas ou trajetórias preferenciais rasas, embora sua adoção deva considerar estratigrafia, profundidade de interceptação, viabilidade executiva e custos. Observou-se ainda que a relação entre extensão do tapete e redução de vazão não é linear, reforçando a necessidade de dimensionamento caso a caso. Recomenda-se, como continuidade, comparar geomembranas a cortinas de injeção e avaliar configurações de cobertura ampliada ao longo do talude de montante para maximizar a interceptação do fluxo.

Palavras-chave: Barragens de terra. Percolação. Geomembranas. Trincheira de vedação.

ABSTRACT

This study evaluates the feasibility of using geosynthetics in earth-dam foundations to mitigate seepage, combining a literature review with a case study based on numerical modeling in Slide 6.0. A homogeneous compacted-clay dam was assessed under six scenarios: a baseline without treatment; upstream foundation geomembrane liners 30, 45, 60, and 75 m long; and a cutoff trench intercepting the most permeable foundation layer. By elongating flow paths, the geomembrane reduced pore-water pressures and hydraulic gradients, yielding seepage-discharge decreases of 16.27% (30 m), 46.3% (45 m), 66.83% (60 m), and 69.82% (75 m) relative to the baseline; the marginal gain from 60 to 75 m is attributed to a shallow, highly permeable layer remaining exposed to reservoir water. The cutoff exhibited superior hydraulic performance, reducing discharge by 89.3%. Both solutions are technically feasible: geomembranes, when properly sized and installed, provide effective seepage control with a favorable cost–benefit ratio, whereas cutoff trenches are advantageous where foundations include highly conductive formations or deep preferential flow paths, subject to stratigraphy, constructability, and cost constraints. The non-linear relation between liner length and seepage reduction underscores the need for case-by-case design. Future work should compare geomembranes with grout curtains and assess extended coverage along the upstream slope to maximize flow interception.

Keywords: Earth dams. Seepage. Geomembranes. Cutoff trench.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estatística das causas de ruptura de barragens.	34
Tabela 2 – Coeficientes de permeabilidade adotados por material.	52
Tabela 3 – Resumo dos resultados de vazão obtidos nas análises.	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal da barragem de Apishapa.....	16
Figura 2 - Ordem de grandeza de k para alguns tipos de solos	22
Figura 3 – Caminhos de percolação no interior de uma barragem de terra.....	25
Figura 4 – Rede de fluxo na fundação de barragem.....	32
Figura 5 – Geomembrana.....	35
Figura 6 – Geogrelhas.....	37
Figura 7 – Geotêxtil.....	38
Figura 8 – Georrede.....	39
Figura 9 – Geocomposto	40
Figura 10 – Barragem de terra com trincheira de vedação.....	43
Figura 11 – Sistema de vedação com cortina de injeção.....	44
Figura 12 – Tratamento de fundação com tapete a montante.....	45
Figura 13 – Resumo das atividades realizadas.....	48
Figura 14 - Seção hipotética utilizada nas análises de percolação.....	50
Figura 15 - Seções com trincheira de vedação e tapete a montante.....	51
Figura 16 - Seção sem tratamento de fundação.....	54
Figura 17 – Condições de contorno e malha de elementos finitos gerada.....	54
Figura 18 - Análise sem tratamento de fundação.....	56
Figura 19 - Análise de percolação com geomembrana de 30,0 m a montante.....	59
Figura 20 - Análise de percolação com geomembrana de 45,0 m.....	61
Figura 21 - Análise de percolação com geomembrana de 60,0 m.....	63
Figura 22 - Análise de percolação com geomembrana de 75,0 m.....	65
Figura 23 - Análise de percolação com <i>Cut-off</i>	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual de redução na vazão em comparação ao cenário referência.	69
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
1.2 Justificativa	13
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 PANORAMA HISTÓRICO DAS BARRAGENS	14
2.1.1 Barragens de terra e enrocamento	16
2.2 LEGISLAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS	18
2.3 FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS	20
2.3.1 Permeabilidade dos materiais	20
2.3.2 Carga Hidráulica	22
2.4 PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA	24
2.4.1 Gradiente hidráulico crítico	25
2.4.2 Análises de percolação	27
2.4.3 Redes de fluxo	29
2.5 ACIDENTES NAS BARRAGENS	32
2.6 GEOSSINTÉTICOS	34
2.6.1 Geomembranas	35
2.6.2 Geogrelhas	36
2.6.3 Geotêxteis	37
2.6.4 Georredes	38
2.6.5 Geocompostos	40
2.7 TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO	41
2.7.1 Trincheiras de vedação	42
2.7.2 Cortinas de injeção	43
2.7.3 Tapete a montante	44
3 METODOLOGIA	46
3.1 ESTUDO DE CASO	46
3.1.1 Software Slide	48
3.1.2 Geometria da seção transversal	49

3.1.3 Parâmetros de permeabilidade.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 SEÇÃO SEM TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO.....	53
4.2 SEÇÃO COM GEOMEMBRANA	57
4.2.1 Geomembrana de 30 metros	57
4.2.2 Geomembrana de 45 metros	60
4.2.3 Geomembrana de 60 metros	62
4.2.4 Geomembrana de 75 metros	64
4.3 SEÇÃO COM TRINCHEIRA DE VEDAÇÃO (CUT-OFF).....	66
4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	68
5 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas de engenharia cuja importância técnica é reconhecida em diferentes contextos da infraestrutura contemporânea. Estas construções podem ser destinadas à geração de energia hidrelétrica, abastecimento de água potável, controle de cheias e retenção de resíduos sólidos oriundos de atividades minerárias. Dentre os tipos existentes, as barragens de terra e de enrocamento apresentam-se como alternativas frequentes na prática projetual, em função da disponibilidade local dos insumos utilizados em sua construção, o que pode implicar menores despesas com transporte de materiais. Esses insumos englobam, majoritariamente, recursos naturais como argilas, siltes e areias, bem como materiais industrializados, como britas e blocos de enrocamento, conforme caracterizado (Palmeira, 2018).

No entanto, tais estruturas demandam rigor técnico durante todas as fases de sua execução e operação, uma vez que determinadas falhas podem comprometer sua estabilidade. Entre os fatores comumente observados está a percolação de água no interior da barragem ou em sua fundação. Neste sentido, Caputo (2017) destaca a necessidade de controle rigoroso desse fenômeno, pois ele pode afetar diretamente a integridade da estrutura, sobretudo em solos cuja permeabilidade não foi adequadamente tratada.

Por outro lado, a recorrência de instabilidades associadas à percolação de água em fundações de barragens de terra tem sido relatada em estudos técnicos, apontando que a inadequação na escolha ou no preparo do solo pode resultar em diferenciais de permeabilidade entre o corpo da barragem e sua fundação. Massad (2010) observa que essa discrepância pode comprometer o desempenho hidráulico da estrutura, tornando-a suscetível a processos erosivos internos, que podem evoluir para estados críticos.

Como medida técnica para a contenção da percolação em fundações de barragens, por exemplo, tem-se empregado diferentes formas de tratamento. Dentre elas, destacam-se as trincheiras de vedação (*cut-offs*) e as cortinas de estacas-prancha, ambas descritas por Massad (2010) como efetivas na redução da condutividade hidráulica do solo de fundação. Todavia, esses métodos enfrentam restrições práticas, sobretudo em empreendimentos de grande escala, nos quais o acesso às fundações é limitado e os custos de execução podem ser significativamente elevados.

Já Sandroni e Guidicini (2022) observam que, quando esses dispositivos são corretamente projetados e executados, podem resultar em fluxos subterrâneos residuais

desprezíveis. Ainda assim, a heterogeneidade das camadas geológicas e a profundidade de certos estratos permeáveis impõem dificuldades à sua plena interceptação, o que limita sua aplicabilidade em alguns casos.

Nesse contexto, a engenharia geotécnica tem incorporado soluções tecnológicas mais recentes com o objetivo de ampliar a eficácia estrutural e reduzir os custos de execução. Um exemplo é o uso de geossintéticos, materiais de base polimérica desenvolvidos para funções específicas em obras civis e ambientais, como descrito por Pereira (2018). Essas tecnologias passaram a integrar diferentes etapas construtivas, desempenhando funções como reforço, separação, filtragem, drenagem e barreira contra fluidos.

Em linhas gerais, os geossintéticos apresentam desempenho satisfatório em situações nas quais há interação direta entre solo e água, sendo empregados em obras de estabilização de taludes, fundações de aterros e sistemas de impermeabilização. Sua utilização contribui para a minimização de processos erosivos e para o controle hidráulico, ampliando a segurança de estruturas como barragens (Palmeira, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a viabilidade do emprego de geossintéticos na fundação de barragens de terra, com foco na mitigação dos efeitos da percolação.

1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar os principais materiais capazes de contribuir para o desempenho estrutural de barragens de terra, com destaque para as propriedades dos geossintéticos;
- Avaliar comparativamente o desempenho de geomembranas em diferentes configurações aplicados na base de barragens de terra, com base em parâmetros técnicos e hidráulicos obtidos em estudo de caso.

1.2 JUSTIFICATIVA

A percolação de água em fundações de barragens de terra constitui um fator de risco estrutural amplamente reconhecido na literatura técnica. Esse fenômeno pode originar processos de erosão interna, redução da resistência mecânica dos materiais de suporte e, em casos críticos, o colapso da estrutura. A relevância do tema é evidenciada por eventos registrados em empreendimentos de grande porte, cujas consequências envolvem não apenas perdas materiais, mas impactos ambientais e sociais de ampla extensão.

Diante desse panorama, torna-se pertinente a investigação de soluções técnico-construtivas que contribuam para a redução da condutividade hidráulica nas fundações dessas estruturas. O uso de geossintéticos, materiais de base polimérica com propriedades específicas de retenção, drenagem e reforço, tem sido objeto de estudos que indicam potencial de aplicação em sistemas de controle da percolação. No entanto, a literatura ainda apresenta lacunas no que se refere à avaliação comparativa de diferentes tipos e disposições desses materiais em contextos específicos, como o da base de barragens de terra.

A escolha por abordar essa temática justifica-se, principalmente, pela necessidade de ampliar o corpo de conhecimento técnico sobre o desempenho hidráulico de geossintéticos quando aplicados à fundação de barragens, contribuindo para a formulação de diretrizes que subsidiem práticas projetuais e operacionais mais seguras. A análise sistematizada de dados técnicos e o exame da eficácia de diferentes configurações desses materiais visam fornecer subsídios que possam ser incorporados ao processo de tomada de decisão em projetos de engenharia geotécnica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PANORAMA HISTÓRICO DAS BARRAGENS

As primeiras experiências com barragens no território brasileiro remontam ao final do século XIX, período em que se intensificaram as preocupações relacionadas à escassez hídrica no semiárido nordestino. A construção de açudes para armazenamento de água era vista como uma solução estratégica para mitigar os efeitos das longas estiagens, que comprometiam tanto a subsistência das populações locais quanto o desenvolvimento agrícola. Esse cenário motivou a criação da Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), em 1909, posteriormente transformada no Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), órgão que desempenhou papel central na política hídrica do país ao longo do século XX (Comitê Brasileiro de Barragens, 2011).

Durante as primeiras décadas de sua atuação, o DNOCS promoveu a construção de centenas de açudes públicos em regiões interioranas do Nordeste. Essas estruturas, geralmente de terra compactada, foram concebidas para garantir a regularização do abastecimento hídrico em áreas sujeitas à irregularidade pluviométrica. A política de combate às secas fundamentava-se na concepção de obras hidráulicas como instrumentos de integração territorial e de controle técnico sobre os recursos naturais. O projeto de construção de barragens esteve, nesse sentido, intimamente vinculado ao ideário desenvolvimentista que marcou as políticas públicas brasileiras do início do século XX (Comitê Brasileiro de Barragens, 2011).

A partir da década de 1950, a construção de barragens adquiriu nova configuração com a consolidação do modelo de industrialização por substituição de importações. Nesse contexto, a expansão da malha hidroenergética passou a ser prioridade do Estado, sendo incorporada aos planos nacionais de desenvolvimento. As barragens hidrelétricas, além de garantirem o fornecimento de energia elétrica em escala nacional, passaram a simbolizar o progresso técnico e a modernização econômica do país. Projetos de grande envergadura, como as usinas de Furnas (inaugurada em 1963) e Itaipu (inaugurada em 1984), demandaram complexos arranjos político-institucionais e mobilizaram tecnologias até então inéditas no Brasil (Uehara, 2005).

A engenharia nacional, em cooperação com instituições internacionais, desenvolveu competências específicas para a construção dessas grandes obras. Segundo Uehara (2005), esse período foi marcado por uma intensa transferência de conhecimento técnico, que possibilitou a

formação de quadros especializados em geotecnia, hidrologia, hidráulica e estruturas de concreto. A construção de barragens hidrelétricas tornou-se, assim, um campo privilegiado de experimentação científica e de formulação de soluções técnicas adaptadas às condições topográficas e geológicas brasileiras.

No entanto, o processo de implantação dessas infraestruturas não foi isento de controvérsias. A partir dos anos 1970, começaram a emergir, com maior intensidade, críticas aos impactos ambientais e sociais resultantes da construção de grandes barragens. Entre os principais pontos de tensão, destacam-se o alagamento de áreas habitadas, o deslocamento forçado de comunidades, a perda de biodiversidade e a transformação dos ecossistemas aquáticos. Os debates em torno da barragem de Sobradinho, no Rio São Francisco, e, posteriormente, de Belo Monte, no Pará, evidenciam a complexidade das negociações entre os interesses econômicos, ambientais e sociais envolvidos nesses projetos (Vainer, 2003).

Nesse período, o movimento dos atingidos por barragens passou a ganhar visibilidade, mobilizando populações deslocadas e pressionando o poder público por políticas de reparação e reconhecimento. Como aponta Vainer (2003), esse movimento se constituiu não apenas como um ator político, mas como um agente produtor de narrativas alternativas às versões oficiais do progresso. A reivindicação por justiça social e o questionamento das assimetrias de poder nos processos decisórios tornaram-se centrais na crítica aos megaprojetos hidrelétricos.

O contexto internacional também contribuiu para a reformulação das diretrizes relacionadas à construção de barragens. Em 1998, foi criada a Comissão Mundial de Barragens (*World Commission on Dams – WCD*), com o objetivo de revisar criticamente as práticas adotadas na execução dessas obras ao redor do mundo. O relatório final da WCD, publicado em 2000, destacou a necessidade de mudanças estruturais na forma como os projetos são concebidos, com ênfase na transparência, na participação social e na avaliação de alternativas tecnológicas (Comitê Brasileiro de Barragens, 2011). As recomendações da comissão passaram a influenciar as políticas nacionais em diversos países, incluindo o Brasil, que incorporou, ainda que de maneira gradual, dispositivos legais e normativos voltados à mitigação dos impactos negativos e à promoção de processos decisórios mais inclusivos.

Atualmente, a história das barragens no Brasil deve ser compreendida como resultado de múltiplas forças em disputa: interesses estatais, demandas energéticas, pressões ambientais e mobilizações sociais. A trajetória das barragens brasileiras reflete, assim, transformações

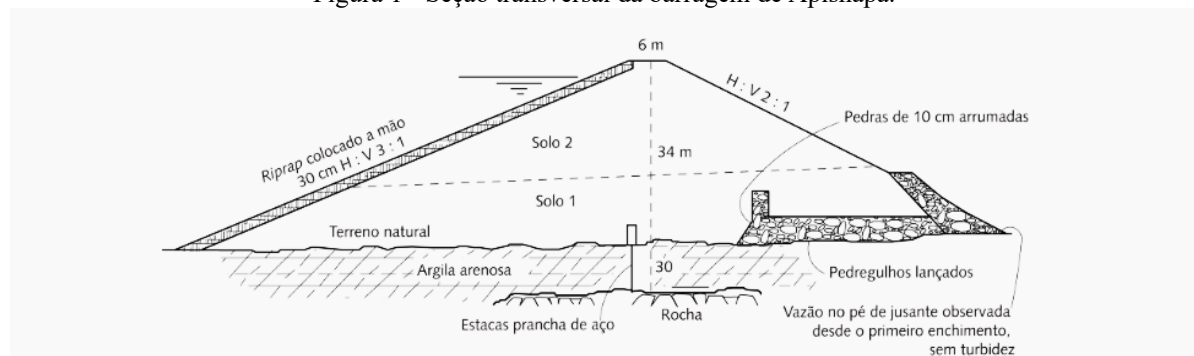
tecnológicas e institucionais, bem como tensões sociopolíticas que continuam a moldar o campo da infraestrutura hídrica nacional.

2.1.1 Barragens de terra e enrocamento

As barragens de terra e enrocamento configuram uma tipologia tradicional e consolidada dentro da engenharia geotécnica, sendo classificadas de acordo com os materiais empregados na constituição do corpo da estrutura. A designação “barragem de terra” refere-se às estruturas erguidas com solos naturais ou pouco modificados, enquanto as “barragens de enrocamento” caracterizam-se pelo uso de fragmentos rochosos, usualmente provenientes de desmontes em áreas próximas ao local da obra (Sandroni; Guidicini, 2022).

Do ponto de vista conceitual, uma barragem de terra é uma estrutura construída por meio da compactação sucessiva de camadas de solo. A composição pode ser homogênea – quando se utiliza um único tipo de solo em todo o corpo da barragem – ou zonada, em que diferentes materiais são distribuídos segundo funções específicas, como suporte estrutural ou controle hidráulico. A escolha por uma seção homogênea ou zonada está condicionada a critérios geotécnicos, à disponibilidade de materiais e ao dimensionamento da estrutura com base nos carregamentos atuantes (Massad, 2010). A Figura 1 apresenta a representação em seção da barragem de terra de Apishapa.

Figura 1 - Seção transversal da barragem de Apishapa.



Fonte: Sandroni; Guidicini (2022)

As barragens de enrocamento, por sua vez, são compostas por materiais de granulometria grosseira, majoritariamente rochas britadas ou blocos naturais, lançados de maneira controlada. Esses materiais formam o esqueleto estrutural da barragem, conferindo resistência à ação de empuxos e permitindo o ajuste da geometria dos taludes segundo parâmetros de estabilidade. Em arranjos mais elaborados, essas estruturas podem incluir

núcleos centrais ou revestimentos em materiais com função de vedação, embora essa funcionalidade não seja o foco da presente análise (Silveira, 2019).

Os critérios construtivos para barragens de terra e enrocamento estão intrinsecamente ligados às propriedades geotécnicas dos materiais utilizados, à geometria da fundação e ao controle rigoroso dos processos de compactação. A composição mineralógica, a plasticidade, a densidade natural e a sensibilidade à umidade são parâmetros determinantes para a classificação dos solos que compõem os diferentes elementos da barragem. Em geral, argilas de média a alta plasticidade são utilizadas em regiões centrais, enquanto solos arenosos, siltes ou materiais com elevada resistência ao cisalhamento são empregados nas ombreiras ou nas zonas de sustentação lateral (Sayão, 2009).

No que se refere à geometria, as barragens de terra e enrocamento são majoritariamente caracterizadas por seções trapezoidais com taludes inclinados, os quais devem ser definidos com base nas condições de estabilidade estática e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos materiais envolvidos. A altura total da estrutura, o comprimento da crista e o volume de aterro influenciam diretamente nas decisões de projeto, assim como o método de lançamento e espalhamento dos materiais. O uso de equipamentos específicos, como tratores de esteira, rolos vibratórios e motoniveladoras, integra as rotinas de execução, com atenção ao controle de espessura de camada, energia de compactação e teor de umidade ótimo (Sandroni; Guidicini, 2022).

É importante ressaltar que as barragens de enrocamento demandam cuidados adicionais no processo de lançamento dos blocos rochosos, sobretudo no que se refere ao controle da forma, granulometria e empacotamento. A distribuição dos blocos deve ser realizada de modo a evitar a ocorrência de zonas frágeis ou ocos internos, que podem comprometer a rigidez do maciço. A intertravamento mecânico entre os elementos rochosos é um aspecto técnico fundamental para a eficácia estrutural da barragem como um todo (Silveira, 2019).

As interfaces entre camadas distintas, ou entre a barragem e a fundação, também requerem análise técnica especializada, uma vez que dissimilaridades nas propriedades dos materiais podem gerar concentrações de tensões, recalques diferenciais ou desvios de fluxo que afetam o comportamento global da estrutura. Nesses casos, o projeto geométrico deve contemplar elementos de transição, como faixas graduais de materiais intermediários ou estruturas de contato especialmente tratadas, com vistas à homogeneização das respostas mecânicas dos diferentes segmentos da barragem (Sayão, 2009).

A escolha por barragens de terra e enrocamento está fortemente condicionada à disponibilidade de materiais adequados nas imediações do sítio da obra. A exploração de jazidas locais, aliada à possibilidade de adaptação da geometria da barragem ao relevo natural, confere a essa tipologia um grau elevado de viabilidade técnico-econômica, especialmente em empreendimentos de médio porte. Além disso, o conhecimento acumulado ao longo de décadas de aplicação em diferentes regiões do mundo consolidou um conjunto de práticas construtivas e parâmetros de desempenho que servem de base para decisões projetuais fundamentadas na experiência empírica e na engenharia baseada em evidências (Melo, 2014).

Assim, o estudo aprofundado das características físicas, mecânicas e geométricas das barragens de terra e enrocamento, desconsiderando neste momento as variáveis relacionadas à percolação, legislação ou segurança, aponta para um sistema estrutural cujo desempenho depende fundamentalmente da compreensão integrada das propriedades dos materiais, da metodologia construtiva e da adequação morfológica ao contexto de implantação.

2.2 LEGISLAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS

A construção e a operação de barragens de terra e enrocamento no Brasil são regidas por um conjunto de normas técnicas e dispositivos legais que visam assegurar a integridade estrutural dessas obras e a proteção das populações e do meio ambiente. A principal legislação que estabelece diretrizes para a segurança de barragens é a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB).

A PNSB define os critérios para a classificação das barragens quanto ao risco e ao dano potencial associado, além de estabelecer as responsabilidades dos empreendedores e dos órgãos fiscalizadores. De acordo com a lei, os empreendedores são responsáveis por elaborar e implementar o Plano de Segurança da Barragem (PSB), que deve conter informações técnicas sobre a estrutura, procedimentos de monitoramento, inspeções regulares e planos de ação em situações de emergência. A periodicidade das inspeções e a qualificação das equipes responsáveis são determinadas em função da categoria de risco e do dano potencial associado à barragem (BRASIL, 2010).

Complementando a legislação federal, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) emitiu a Resolução nº 91, de 2012, que estabelece diretrizes para a implementação da PNSB. Essa resolução detalha os procedimentos para a elaboração dos PSBs,

incluindo a estrutura mínima dos documentos, os prazos para sua apresentação e os critérios para a realização das inspeções de segurança. A ANA também disponibiliza manuais e guias técnicos que orientam os empreendedores na elaboração dos PSBs e na condução das inspeções, como o "Manual do Empreendedor sobre Segurança de Barragens" (ANA, 2016).

No âmbito das normas técnicas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou a NBR 13028:2017, que especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projetos de barragens de mineração, incluindo as de terra e enrocamento. Essa norma estabelece critérios para o dimensionamento das estruturas, seleção de materiais, métodos construtivos e procedimentos de monitoramento e manutenção. Além disso, a ABNT NBR 7182:2016 trata dos ensaios de compactação de solos, fundamentais para o controle da qualidade dos materiais utilizados na construção de barragens de terra (ABNT, 2017; ABNT, 2016).

A legislação brasileira também prevê a atuação de órgãos fiscalizadores em diferentes esferas de governo. No caso das barragens destinadas à geração de energia elétrica, a responsabilidade pela fiscalização recai sobre a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para as barragens de usos múltiplos, como abastecimento de água e irrigação, a fiscalização é atribuída à ANA ou aos órgãos estaduais competentes. Esses órgãos têm o dever de manter cadastros atualizados das barragens sob sua jurisdição, avaliar os PSBs apresentados pelos empreendedores e realizar inspeções periódicas para verificar as condições de segurança das estruturas (ANA, 2016).

No âmbito do estado de Minas Gerais, destaca-se a Lei Estadual nº 23.291/2019, que institui a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB). Essa legislação é aplicável às barragens de água, de rejeitos industriais ou de mineração, desde que atendam a critérios técnicos previamente definidos quanto à altura da estrutura, capacidade de reserva ou potencial de dano ambiental associado. O detalhamento dos procedimentos operacionais e administrativos referentes à PESB foi regulamentado pelo Decreto Estadual nº 48.140/2021, o qual disciplina aspectos como o licenciamento ambiental, o monitoramento sistemático das estruturas e a exigência de planos de segurança e de emergência, em consonância com as diretrizes da legislação federal vigente.

Nesse contexto estadual, a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) desempenha o papel de fiscalização e acompanhamento das barragens localizadas em território mineiro, especialmente na interface entre controle ambiental e segurança geotécnica. A atuação da FEAM inclui a exigência de cadastros atualizados, vistorias técnicas e análise de documentos

como o Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE), conforme definido nos normativos legais.

Complementarmente, no nível federal, a Agência Nacional de Mineração (ANM) é o órgão responsável pela fiscalização das barragens de mineração, amparada pela Lei Federal nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Essa legislação estabelece critérios técnicos para a classificação de risco e dano potencial associado, diretrizes para elaboração e atualização dos PSBs, além da obrigatoriedade de inspeções regulares e auditorias técnicas. Com a promulgação da Lei nº 14.066/2020, a PNSB foi significativamente atualizada, ampliando as exigências de segurança, aumentando o rigor nas obrigações dos empreendedores e promovendo maior transparência na divulgação de informações à sociedade civil.

É importante destacar que, além das normas e legislações específicas para barragens, a construção dessas estruturas deve observar as normas gerais de engenharia e segurança do trabalho, como a Lei nº 5.194/1966, que regula o exercício das profissões de engenheiro e arquiteto, e as normas regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego (BRASIL, 1966).

Dessa forma, a legislação brasileira estabelece um arcabouço normativo abrangente para a construção e operação de barragens de terra e enrocamento, visando garantir a segurança dessas estruturas e minimizar os riscos associados à sua existência. O cumprimento rigoroso das normas técnicas e legais é fundamental para assegurar a integridade das barragens e a proteção das comunidades e do meio ambiente.

2.3 FLUXO DE ÁGUA EM MEIOS POROSOS

2.3.1 Permeabilidade dos materiais

Para Sayão (2009), a permeabilidade dos materiais representa a capacidade de um solo ou rocha permitir a passagem de água através de seus vazios, sob a ação de um gradiente hidráulico. Em outras palavras, está diretamente relacionada à facilidade com que a água se desloca no interior de um meio poroso, sendo, por isso, determinante para a previsão de fluxos subterrâneos, controle de percolação, estabilidade de taludes e eficiência de sistemas de drenagem (Massad, 2010; Sayão, 2009).

Em linhas gerais, a origem da permeabilidade de um solo está em sua estrutura física e em suas propriedades intrínsecas. Dentre os fatores que mais influenciam esse comportamento estão a granulometria, a forma e disposição das partículas, o índice de vazios, a densidade relativa, o grau de saturação e a viscosidade do fluido percolante. Solos granulares, como areias e pedregulhos, tendem a apresentar permeabilidades elevadas devido ao maior volume de poros interconectados, que oferecem menos resistência ao fluxo de água. Já os solos finos, como siltes e argilas, possuem permeabilidades muito menores, em razão da menor dimensão dos poros e da capacidade das partículas em reter água em sua superfície por adesão e capilaridade (Silveira, 2019; Cruz, 1996).

Em contextos como o das barragens de terra, conhecer a permeabilidade dos materiais utilizados é essencial para garantir o controle adequado da percolação e, conseqüentemente, a estabilidade da estrutura. Um material com permeabilidade excessiva pode permitir que grandes volumes de água atravessem o corpo ou a fundação da barragem, promovendo a erosão interna e a formação de caminhos preferenciais de fluxo. Por outro lado, um material com baixa permeabilidade, quando mal empregado, pode causar a elevação das pressões neutras e comprometer a resistência ao cisalhamento do maciço. Dessa forma, a seleção dos materiais de construção deve levar em conta a resistência mecânica, bem como seu comportamento hidráulico, exigindo, para isso, investigações geotécnicas detalhadas e ensaios específicos de permeabilidade (Palmeira, 2018).

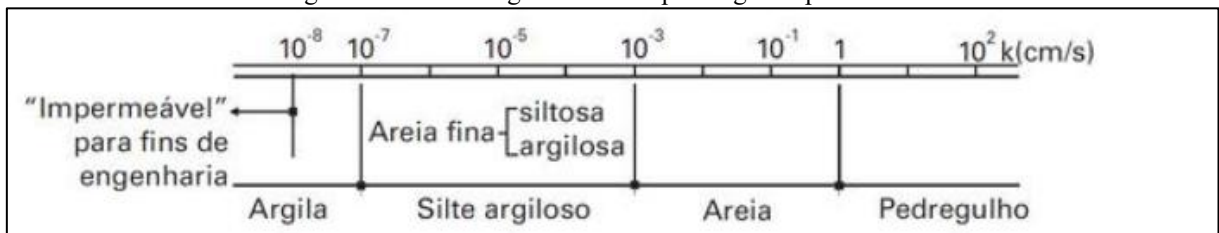
Os métodos de determinação da permeabilidade dividem-se, em geral, entre ensaios de laboratório e ensaios realizados em campo. Os ensaios de laboratório mais empregados são os de carga constante e carga variável, realizados com permeâmetros que simulam o fluxo unidimensional em amostras de solo saturado. Esses métodos permitem o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), expresso em unidades de velocidade (geralmente cm/s), e são particularmente úteis para amostras de solo homogêneo e com estrutura pouco perturbada. No campo, o ensaio Lefranc (para solos granulares) e o ensaio Lugeon (para rochas fissuradas) são frequentemente utilizados para estimar a permeabilidade *in situ*, proporcionando dados mais representativos das condições reais do solo ou rocha de fundação (Teixeira Menezes, 2021; Sayão, 2009).

Além da determinação do valor de k , é necessário considerar a anisotropia do solo, ou seja, a variação da permeabilidade em diferentes direções. Em muitos casos, os materiais naturais apresentam uma permeabilidade mais elevada na direção horizontal do que na vertical, em virtude da orientação dos grãos, da deposição sedimentar ou da compactação por camadas.

Essa anisotropia deve ser levada em conta nos modelos de fluxo, sobretudo na simulação da percolação em estruturas com heterogeneidades acentuadas ou interfaces entre diferentes tipos de materiais (Melo, 2014).

Outro ponto que merece atenção é o papel da compactação na alteração da permeabilidade dos solos. A compactação adequada reduz significativamente o volume de vazios e melhora o contato entre as partículas, dificultando o deslocamento da água e, portanto, reduzindo o coeficiente de permeabilidade. Isso justifica o controle rigoroso da compactação nas obras de barragens como mecanismo de melhoria da resistência mecânica e como estratégia para garantir o desempenho hidráulico previsto em projeto. Solos mal compactados podem apresentar zonas com alta permeabilidade localizada, que funcionam como canais de percolação preferencial, elevando os riscos de instabilidade interna (Sandroni; Guidicini, 2022) – Figura 2.

Figura 2 - Ordem de grandeza de k para alguns tipos de solos



Fonte: Adaptado de Alonso (2018).

2.3.2 Carga Hidráulica

A carga hidráulica, também chamada de potencial hidráulico, expressa a energia por unidade de peso que a água possui em determinado ponto do solo. Para Paulo (2019), essa energia resulta da combinação de três componentes fundamentais: a carga de pressão, a carga de posição (ou carga de elevação) e, em alguns casos, a carga cinética, que, apesar de geralmente desprezível em solos, pode adquirir importância em certos fluxos concentrados (Paulo, 2019).

Do ponto de vista físico, a carga hidráulica é representada por uma altura equivalente de coluna d'água, expressa em metros, que indica o nível ao qual a água se elevaria em um piezômetro instalado naquele ponto específico. Esse valor sintetiza o estado energético da água subterrânea, permitindo a interpretação do seu movimento dentro do solo, cuja direção segue sempre do ponto de maior carga para o de menor carga. A interpretação correta desse fenômeno é essencial para a definição de linhas de fluxo e equipotenciais, elementos fundamentais nos modelos de percolação e estabilidade hidráulica (Marcuzzo; Wendland, 2011).

Nas aplicações práticas da engenharia geotécnica, a análise da carga hidráulica envolve a determinação do gradiente hidráulico, que é a razão entre a diferença de carga entre dois pontos e a distância que os separa. Esse gradiente é o que efetivamente impulsiona a água no interior do solo. Sua magnitude depende tanto da topografia do sistema quanto das características hidráulicas do material atravessado. Em meios mais porosos e homogêneos, as variações de carga tendem a ser mais suaves, enquanto em solos heterogêneos ou estratificados, podem surgir concentrações de carga capazes de gerar pressões neutras elevadas e, conseqüentemente, instabilidade (Bicalho; Machado, 2015).

Um dos aspectos mais importantes relacionados à carga hidráulica é sua influência sobre as pressões intersticiais. O acúmulo de carga em determinados pontos do maciço pode provocar o aumento da pressão de poro, reduzindo a tensão efetiva e, com isso, a resistência ao cisalhamento do solo. Essa condição, se não for controlada, pode resultar em escorregamentos internos ou até mesmo em rupturas. Por essa razão, os sistemas de drenagem e alívio de carga devem ser projetados com base em uma análise detalhada das distribuições esperadas de carga hidráulica ao longo do tempo e sob diferentes condições operacionais (Teixeira Menezes, 2019).

Importa ressaltar que a avaliação é geralmente realizada por meio de modelos matemáticos baseados na teoria do fluxo em meios porosos. Para uma análise mais precisa, é comum utilizar softwares específicos de modelagem numérica que permitam simular a distribuição de cargas hidráulicas e pressões de poro em diferentes cenários de operação. Essas modelagens, quando bem parametrizadas, fornecem subsídios técnicos para o dimensionamento de filtros, drenos e dispositivos de controle de percolação, fundamentais para garantir a estabilidade da estrutura como um todo (Teixeira Menezes, 2019).

Além das simulações, a medição direta da carga hidráulica é realizada por meio de instrumentação específica, sendo os piezômetros os dispositivos mais comuns. Eles permitem registrar a altura da coluna d'água em pontos estratégicos do solo, fornecendo dados fundamentais para o monitoramento da evolução do campo de cargas hidráulicas ao longo do tempo. Em obras de grande porte, os sistemas automatizados de leitura piezométrica possibilitam a detecção precoce de alterações críticas nos valores de carga, funcionando como uma ferramenta preventiva de extrema relevância (Pinheiro et al., 2018).

Nos estudos contemporâneos, há um esforço crescente no sentido de integrar a carga hidráulica à análise probabilística da estabilidade das obras geotécnicas. Modelos avançados consideram variações sazonais, alterações climáticas, efeitos de recarga e descarga de

reservatórios, além da resposta do solo à variação lenta ou brusca de carga ao longo de ciclos operacionais. Segundo recentes investigações realizadas em contextos latino-americanos, alterações rápidas no nível de carga hidráulica, especialmente em materiais granulares mal compactados, estão entre os principais fatores desencadeadores de instabilidades locais e de surgimento de zonas preferenciais de percolação (Teixeira Menezes, 2019).

De todo modo, vale lembrar que a carga hidráulica não é um parâmetro estático. Ela varia ao longo do tempo em função de múltiplas condições de contorno, como o nível do reservatório, as condições de recarga pluvial, o grau de saturação do solo e até mesmo intervenções operacionais como o fechamento abrupto de válvulas ou comportas. Essas variações temporais, denominadas cargas transientes, podem provocar oscilações significativas no gradiente hidráulico, exigindo modelagens específicas que considerem a não linearidade do fluxo e os efeitos retardados de dissipação da carga (Bicalho; Machado, 2015).

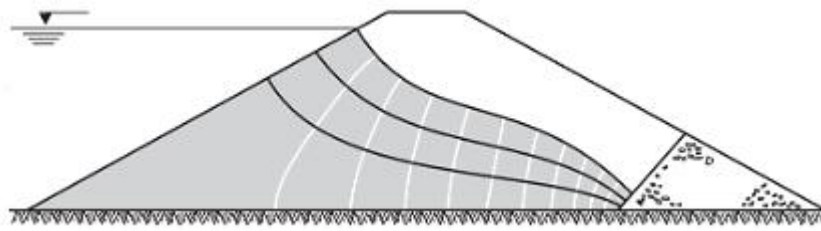
2.4 PERCOLAÇÃO EM BARRAGENS DE TERRA

Segundo Sousa Barboza e Floriano (2020) a água ocupa grande parte ou totalmente os vazios do solo. Por isso, é de suma importância entender a percolação da água nos solos, já que ela influencia em vários problemas práticos, como cálculo das vazões, análise de recalques e estudos de estabilidade.

De acordo com Sandroni (2017), a percolação é responsável por 38% a 55% dos acidentes em barragens. Para se entender esse tipo de movimentação hídrica, é fundamental compreender a permeabilidade dos materiais. Neste sentido, os coeficientes de permeabilidade são tão menores quanto menores os vazios no solo, e, conseqüentemente, o tamanho de suas partículas. Vale ressaltar que a percolação d'água em barragens de terra pode resultar no excesso de pressões neutras, na instabilidade do maciço de jusante, em erosão interna através do aterro ou fundação, além da formação de caminhos preferenciais na base e na fundação da barragem.

As análises de percolação têm o objetivo de estimar vazões de percolação, das pressões neutras e dos gradientes hidráulicos no maciço da barragem e na fundação para verificar as condições de segurança da obra. A Figura 3 apresenta a seção típica de uma barragem de terra, destacando os caminhos de fluxo da água no interior do maciço.

Figura 3 – Caminhos de percolação no interior de uma barragem de terra.



Fonte: Pinto (2006).

2.4.1 Gradiente hidráulico crítico

A compreensão do comportamento da água ao percolar através do solo em barragens de terra exige atenção especial ao conceito de gradiente hidráulico crítico (GHC), sendo este um parâmetro que sinaliza o limite em que o fluxo de água em um meio poroso provoca a suspensão de partículas sólidas, anulando a capacidade de o solo resistir às tensões impostas pela água em movimento. Esse fenômeno está intimamente relacionado ao mecanismo de instabilização denominado erosão interna, ou *piping*, sendo reiterada frequentemente na literatura técnico-científica como uma das principais causas de falhas em barragens, especialmente aquelas erguidas sobre fundações de elevada permeabilidade ou que apresentam descontinuidade nos estratos (Sandroni; Guidicini, 2022; Silveira, 2019).

Do ponto de vista geotécnico, o gradiente hidráulico pode ser compreendido como a razão entre a diferença de energia hidráulica e a distância ao longo da qual essa diferença se verifica. Em termos práticos, quanto maior o gradiente, maior a força imposta pela água em movimento sobre os grãos do solo. Quando esse valor atinge um patamar considerado crítico, a energia do fluxo passa a ser suficiente para mobilizar as partículas, provocando instabilidade física do maciço. Essa condição é especialmente perigosa em materiais granulares mal compactados ou heterogêneos, nos quais a coesão entre partículas é limitada, e o sistema depende basicamente da fricção para se manter estável (Pereira, 2010).

O fenômeno associado ao GHC pode evoluir rapidamente. Inicialmente, forma-se uma pequena rede de canais preferenciais, invisíveis a olho nu, que progressivamente se alargam com o arraste de partículas, criando um percurso erosivo por onde o fluxo se intensifica. Esse mecanismo, denominado “erosão regressiva interna”, compromete gradualmente a integridade da estrutura e pode culminar em colapsos parciais ou totais, como amplamente documentado por órgãos técnicos como o *United States Bureau of Reclamation* e o *International Committee on Large Dams* (ICOLD, 2017). A relevância desse aspecto torna-se ainda mais evidente diante do número de incidentes relacionados à percolação não controlada, que, segundo estudos de

Sayão (2009), correspondem a uma fração significativa das rupturas documentadas em barragens de terra ao redor do mundo.

A avaliação da condição crítica de fluxo no solo exige, portanto, um trabalho duplo: o conhecimento das propriedades hidráulicas e mecânicas dos materiais envolvidos e a análise do sistema construtivo, das interfaces entre a barragem e sua fundação e do histórico de tensões atuantes. Em estruturas bem projetadas, mecanismos de defesa são incorporados à concepção, como filtros drenantes, mantas geossintéticas e zonas de transição entre camadas de materiais distintos. Esses elementos têm como objetivo dissipar a energia do fluxo, evitar o desenvolvimento de pressões intersticiais excessivas e impedir o início do transporte de partículas por meio da água em movimento (Palmeira, 2018; Teixeira Menezes, 2021).

Outro aspecto que merece destaque é o comportamento diferenciado dos solos frente ao desenvolvimento do gradiente hidráulico. Enquanto os solos coesivos tendem a resistir à erosão mesmo sob gradientes relativamente elevados, em função da coesão entre partículas finas, os solos arenosos ou silto-arenosos são extremamente sensíveis, especialmente quando depositados em condições naturais ou com compactação deficiente. Nesses casos, pequenos incrementos na carga hidráulica podem desencadear processos de instabilização importantes. Estudos de campo e ensaios laboratoriais mostram que o grau de uniformidade granulométrica, o índice de vazios, a densidade relativa e a orientação das camadas são fatores determinantes na resistência à erosão interna e, conseqüentemente, no valor do gradiente crítico efetivo (Melo, 2014; Massad, 2010).

Em fundações com presença de lençol freático próximo à superfície, ou que apresentem estratos arenosos confinados sob camadas menos permeáveis, a condição crítica pode ser atingida com relativa facilidade, principalmente em situações de sobrecarga hidráulica associadas a cheias prolongadas, operação inadequada de vertedouros ou falhas nos sistemas de drenagem. Em tais circunstâncias, o fluxo vertical ascendente aumenta a pressão nos poros, reduz a tensão efetiva e promove a ruptura por “boil”, caracterizada pelo surgimento de fluxos visíveis de água misturada com partículas do solo na jusante da estrutura (Silveira, 2019).

Nesse sentido, a análise preventiva do gradiente hidráulico crítico constitui uma etapa essencial no projeto e na avaliação da segurança de barragens de terra. A definição de critérios de projeto deve considerar margens de segurança que levem em conta variações naturais dos materiais, imprecisões nos levantamentos geotécnicos e incertezas quanto ao comportamento a longo prazo das estruturas. Para tal, recomenda-se a realização de investigações em campo, ensaios de permeabilidade e estabilidade hidráulica, bem como a simulação de condições de

carregamento extremo, com vistas a identificar zonas potencialmente vulneráveis à percolação (Cruz, 1996; Sandroni; Guidicini, 2022).

2.4.2 Análises de percolação

Conforme Massad (2010), as análises de percolação constituem uma etapa no estudo do comportamento hidráulico de barragens de terra, permitindo compreender a distribuição dos fluxos subterrâneos, estimar a dissipação de energia hidráulica e avaliar o potencial de instabilidade decorrente da movimentação de água no interior do maciço e, sobretudo, em sua fundação. Para Silveira (2019), as análises fundamentam-se em princípios da mecânica dos fluidos aplicados a meios porosos, e integram um conjunto de procedimentos teóricos e práticos com o objetivo de prever vazões, identificar zonas de acúmulo de pressão neutra e diagnosticar riscos associados à perda de eficiência estrutural (Massad, 2010; Silveira, 2019).

A percolação apresenta natureza tridimensional e variável no tempo, estando sujeita a múltiplos condicionantes, entre os quais destacam-se a heterogeneidade do solo, a geometria da estrutura, a compactação das camadas, o nível do lençol freático e a anisotropia da permeabilidade. Assim, as análises devem ser conduzidas com rigor técnico, partindo da caracterização adequada dos materiais e da definição das condições de contorno do sistema. Ensaio de laboratório, como permeâmetros de carga constante e variável, são amplamente utilizados para a obtenção do coeficiente de permeabilidade dos solos, parâmetro fundamental para a modelagem do fluxo (Palmeira, 2018; Sayão, 2009).

Do ponto de vista conceitual, a análise da percolação envolve a aplicação da equação de Darcy, que descreve o escoamento laminar de água em meios porosos homogêneos e saturados. Embora se trate de um modelo simplificado, sua adoção é eficaz na maioria dos casos práticos, sobretudo quando associada a métodos computacionais de simulação numérica. Programas como Slide, SEEP/W, *Plaxis* 2D e 3D, e *GeoStudio* possibilitam a análise detalhada da linha de saturação, da distribuição de pressões de poro e dos gradientes hidráulicos em diferentes regiões da barragem. Esses softwares são alimentados com dados provenientes de sondagens, ensaios de campo e laboratório, permitindo a construção de modelos com elevado grau de realismo (Teixeira Menezes, 2019).

Durante o desenvolvimento das análises, é comum representar graficamente o fluxo por meio de linhas equipotenciais e linhas de fluxo, que formam uma malha indicando o caminho preferencial da água. Essas representações são fundamentais para a identificação de zonas críticas, onde o gradiente hidráulico se aproxima do valor crítico ou onde há risco de

concentração de fluxos ascendentes na interface entre a barragem e a fundação. Essas interfaces, muitas vezes negligenciadas, são particularmente vulneráveis, uma vez que a transição entre materiais com propriedades distintas pode favorecer o surgimento de trajetórias erosivas (Cruz, 1996; Sandroni; Guidicini, 2022).

Para Melo (2014), a partir das simulações e dos dados obtidos, é possível estimar as vazões de percolação ao longo do tempo, avaliar o desempenho dos filtros internos e verificar a eficiência de barreiras impermeabilizantes, como tapetes a montante, cortinas de injeção ou geomembranas. Em muitos casos, esses elementos são projetados de forma a conduzir o fluxo para drenos de base ou de pé de talude, evitando a acumulação de pressões neutras no corpo da barragem. O controle dessas pressões é essencial para manter a estabilidade global da estrutura, uma vez que sua elevação pode reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais, provocando escorregamentos ou recalques diferenciais (Melo, 2014; Sayão, 2009).

Outro aspecto relevante nas análises de percolação refere-se à verificação da eficiência dos sistemas de monitoramento e instrumentação. A instalação de piezômetros, drenos instrumentados, poços de observação e medidores de vazão contribui significativamente para a calibração dos modelos teóricos e para o acompanhamento em tempo real do comportamento hidráulico da estrutura. Esses instrumentos permitem detectar variações inesperadas na pressão intersticial, indícios de aumento da percolação ou falhas no sistema drenante, viabilizando ações corretivas antes que o quadro se agrave (Silveira, 2019).

Já em barragens com uso de geossintéticos, as análises de percolação assumem importância ainda mais significativa, pois a presença desses materiais, como geomembranas ou geotêxteis, altera a configuração hidráulica da barragem, impondo novos caminhos ao fluxo e modificando as distribuições de carga hidráulica e pressão neutra. Nesse contexto, o projeto de sistemas que empregam geossintéticos deve prever modelagens específicas que levem em conta sua permeabilidade, espessura, deformabilidade e interfaces com os materiais naturais. A literatura especializada aponta que, quando adequadamente projetados, os geossintéticos contribuem para a homogeneização dos gradientes e para a dissipação controlada da energia do fluxo, reduzindo o risco de piping (Palmeira, 2018; Pereira, 2010).

Em contextos onde há risco elevado de percolação excessiva – como em fundações com camadas arenosas, fraturadas ou com presença de solos dispersivos –, recomenda-se a adoção de análises probabilísticas de fluxo, capazes de simular cenários diversos com variações paramétricas. Essa abordagem fornece uma avaliação mais robusta da segurança hidráulica da estrutura, especialmente quando aliada a análises de risco que integram dados geotécnicos,

hidrológicos e operacionais. As diretrizes internacionais mais recentes sugerem a adoção de fatores de segurança hidráulica e o monitoramento contínuo como boas práticas para a manutenção da estabilidade em longo prazo (ICOLD, 2017).

Ademais, a evolução da instrumentação digital tem ampliado a capacidade de diagnóstico das condições de percolação. O uso de sensores automáticos e sistemas de aquisição de dados permite detectar em tempo real variações sutis nas pressões de poro e nas vazões drenadas. Associados a plataformas de monitoramento remoto, esses dados subsidiam a tomada de decisão baseada em evidências, reduzindo o tempo de resposta a anomalias hidráulicas e aumentando a confiabilidade da operação da barragem (Teixeira Menezes, 2019).

2.4.3 Redes de fluxo

As redes de fluxo constituem representações gráficas fundamentais para a análise de percolação em barragens de terra, permitindo a visualização e interpretação do comportamento do fluxo subterrâneo em meios porosos. De acordo com Massad (2010), uma rede de fluxo é formada pela sobreposição de linhas de fluxo e linhas equipotenciais, as quais se cruzam ortogonalmente, gerando uma malha esquemática que traduz, de forma simplificada, a trajetória da água e a variação da carga hidráulica no interior do maciço e de sua fundação. Essas redes são construídas com base na solução aproximada da equação de Laplace para o regime permanente de fluxo, sendo, portanto, aplicáveis a condições de escoamento laminar e meios porosos saturados homogêneos.

Segundo Cruz (1996), as linhas de fluxo representam os caminhos preferenciais seguidos pelas partículas de água no interior do solo, sendo sempre tangentes à direção da velocidade do escoamento. Já as linhas equipotenciais correspondem a loci de pontos com igual potencial hidráulico, representando quedas de carga iguais ao longo da rede. A interseção entre essas linhas forma as chamadas células de fluxo, que, em um traçado ideal, apresentam formato aproximadamente quadrado, evidenciando a ortogonalidade entre fluxo e gradiente hidráulico. A correta definição dessas células é essencial para a determinação de parâmetros como o comprimento das trajetórias de percolação, a estimativa de vazões e a avaliação dos gradientes hidráulicos máximos atuantes.

Palmeira (2018) destaca que, no contexto de projetos de barragens de terra, as redes de fluxo desempenham papel decisivo na localização e dimensionamento de sistemas de drenagem e de elementos de impermeabilização. Por meio delas, é possível identificar zonas críticas onde há concentração de linhas de fluxo ou encurtamento do percurso hidráulico, condições que

favorecem o aumento local do gradiente e, conseqüentemente, elevam o risco de erosão interna. Nesses casos, ajustes no projeto, como a inserção de filtros, tapetes drenantes ou barreiras impermeáveis, podem ser implementados de forma direcionada.

A construção manual de redes de fluxo, tradicionalmente realizada em papel milimetrado ou vegetal, segue procedimentos estabelecidos em manuais clássicos, como o de Casagrande, adaptados e difundidos no Brasil por autores como Cruz (1996) e Massad (2010). O método consiste em discretizar a seção transversal da barragem e sua fundação, definindo inicialmente as linhas de contorno correspondentes às condições de contorno hidráulico – superfícies impermeáveis, linhas de carga constante ou limites de drenagem livre. A partir daí, são traçadas iterativamente as linhas de fluxo e equipotenciais, respeitando a ortogonalidade e buscando a regularidade das células. Embora este processo seja trabalhoso, oferece grande valor didático e auxilia na compreensão intuitiva da percolação.

Com o avanço da modelagem numérica, a geração de redes de fluxo passou a ser realizada com apoio de softwares especializados, como Slide, SEEP/W, Plaxis e GeoStudio. Esses programas resolvem numericamente a equação de Laplace ou a equação de Richards (quando se consideram condições de fluxo não saturado), gerando malhas de fluxo com elevado detalhamento e precisão. Segundo Teixeira Menezes (2019), a análise computacional permite incorporar condições mais próximas da realidade, como heterogeneidade e anisotropia dos materiais, variações no grau de saturação e geometrias complexas, aspectos que limitavam a precisão das abordagens manuais.

A interpretação de uma rede de fluxo exige atenção a parâmetros-chave. O número de canais de fluxo (N_f) corresponde ao número de faixas delimitadas por linhas de fluxo, enquanto o número de quedas equipotenciais (N_d) é a contagem das faixas delimitadas por linhas equipotenciais. A vazão de percolação (Q) pode ser estimada pela relação:

$$Q = k \cdot H \cdot (N_f / N_d)$$

em que k é o coeficiente de permeabilidade e H a carga hidráulica total aplicada. Conforme Melo (2014), essa expressão, derivada da lei de Darcy, fornece uma estimativa direta da vazão em regime permanente, sendo amplamente utilizada em cálculos preliminares de segurança hidráulica.

Outro aspecto relevante diz respeito à influência das condições de contorno sobre a forma e a densidade da rede. Superfícies impermeáveis, como a fundação rochosa intacta ou

barreiras geossintéticas, desviam o fluxo e tendem a alongar as trajetórias hidráulicas, aumentando a segurança contra *piping*. Por outro lado, camadas de alta permeabilidade ou zonas fraturadas podem encurtar o caminho do fluxo, concentrando gradientes e exigindo reforços no sistema de drenagem (Silveira, 2019).

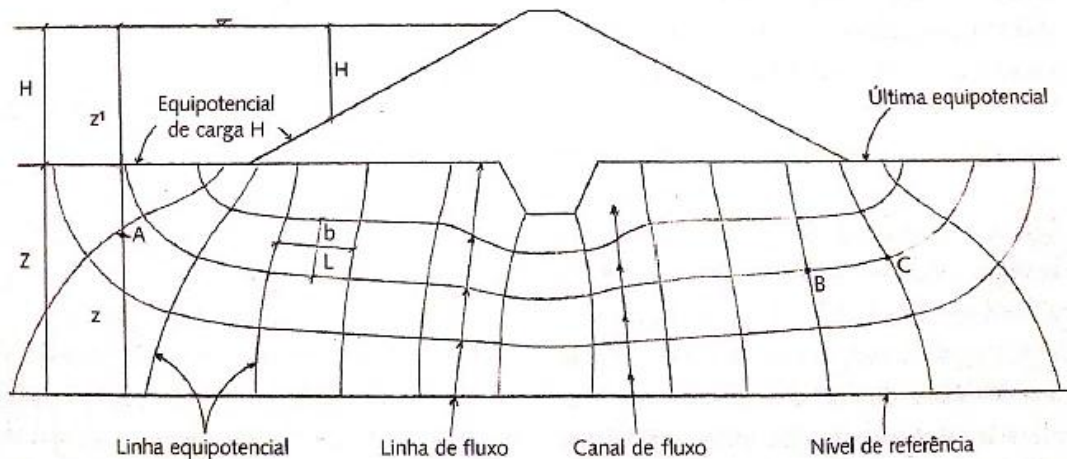
No caso específico de fundações tratadas com geossintéticos, como geomembranas ou geocompostos bentoníticos, a configuração das redes de fluxo sofre modificações significativas. Esses materiais atuam como barreiras hidráulicas, deslocando a linha de saturação e redistribuindo as linhas de fluxo no maciço. Estudos conduzidos por Palmeira (2018) indicam que a inserção de camadas impermeabilizantes bem posicionadas pode reduzir substancialmente o número de canais de fluxo ativos na fundação, minimizando a vazão de percolação e homogeneizando os gradientes.

A aplicação de redes de fluxo não se limita ao projeto inicial. Elas são empregadas também na avaliação de desempenho durante a operação da barragem, especialmente quando associadas a dados obtidos por instrumentação de campo. Piezômetros, por exemplo, permitem verificar se as linhas equipotenciais previstas em projeto correspondem às pressões observadas. Discrepâncias significativas podem indicar problemas como entupimento de drenos, falhas em barreiras ou aumento de permeabilidade em zonas específicas devido a processos erosivos (Sayão, 2009).

Adicionalmente, a análise de redes de fluxo é essencial para o dimensionamento de filtros e drenos, cuja função é controlar a percolação e evitar o arraste de partículas finas. Segundo Cruz (1996), o posicionamento adequado desses elementos depende diretamente da compreensão do padrão de fluxo subterrâneo, de modo que interceptem de forma eficiente as trajetórias hidráulicas críticas.

Sendo assim, as redes de fluxo constituem uma ferramenta indispensável para o estudo e controle da percolação em barragens de terra. Sua utilização, combinando métodos analíticos, construtivos e computacionais, permitindo estimar parâmetros hidráulicos relevantes e orientar intervenções de engenharia para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. A integração entre a análise teórica, os dados de campo e a modelagem numérica potencializa a eficácia dessa abordagem, consolidando-a como prática consolidada na engenharia geotécnica nacional. A Figura 4 mostra configuração de rede de fluxo sob o maciço de barragem hipotética, apresentando linhas de fluxo e equipotenciais.

Figura 4 – Rede de fluxo na fundação de barragem.



Fonte: Costa (2012).

2.5 ACIDENTES NAS BARRAGENS

Segundo Massad (2010), uma das principais causas de acidente em barragens refere-se ao fenômeno do galgamento, que consiste na ultrapassagem da lâmina d'água sobre a crista da estrutura, frequentemente provocada por chuvas excepcionais e dimensionamento inadequado do sistema de vertedouros. O autor alerta que, quando o volume de água do reservatório excede a capacidade de descarga, pode ocorrer erosão regressiva nos taludes de jusante, culminando no colapso completo da estrutura. O caso histórico da barragem de *South Fork*, nos Estados Unidos, é constantemente evocado na literatura como exemplo de colapso por galgamento e negligência hidráulica (Silveira, 2019).

Além disso, outro mecanismo crítico observado nas barragens de terra e enrocamento é a instabilidade de taludes. Sayão (2009) esclarece que esse tipo de acidente pode ocorrer por acúmulo de tensões cisalhantes superiores à resistência ao cisalhamento dos materiais constituintes da estrutura. A variação brusca do nível do reservatório, a saturação superficial por chuvas intensas e as vibrações oriundas de atividades sísmicas ou operacionais são fatores que agravam essa condição. A análise de estabilidade de taludes, como reforça o autor, deve ser uma etapa central em projetos e inspeções, pois sua negligência acarreta risco significativo de escorregamentos e deslizamentos que, mesmo quando localizados, comprometem a segurança global da obra.

Outra falha de natureza estrutural amplamente estudada é o recalque diferencial, conforme discute Silveira (2019). Recalques desse tipo ocorrem quando porções distintas da

fundação da barragem sofrem assentamentos desiguais, levando a deformações internas, fissuras longitudinais ou transversais e perda de contato entre os diferentes materiais estruturais. Quando não identificados e corrigidos em tempo hábil, esses deslocamentos podem comprometer zonas críticas da barragem, como a interface com estruturas de drenagem ou o núcleo de contenção. O autor destaca ainda que essa manifestação está frequentemente associada a compactação heterogênea, substrato geológico heterogêneo e fundações não tratadas com o rigor técnico necessário.

No campo da mecânica dos solos, destaca-se a ocorrência de acidentes provocados por liquefação, principalmente em barragens com solos não coesivos e saturados. De acordo com Melo (2014), a liquefação é induzida por esforços cíclicos, como os decorrentes de abalos sísmicos, que provocam aumento da pressão intersticial até o ponto de perda da resistência efetiva do solo. Nessas circunstâncias, o material se comporta de forma fluida, resultando em instabilidade do corpo da barragem e em deslocamentos volumétricos significativos. Embora a liquefação esteja associada, em geral, a regiões de maior atividade tectônica, Melo (2014) ressalta que o fenômeno pode se manifestar também em ambientes aparentemente estáveis quando solos mal compactados, com estrutura metastável, estão presentes.

Falhas de fundação constituem outro tipo relevante de acidente em barragens de terra e enrocamento. Conforme pontua Sandroni e Guidicini (2022), estruturas construídas sobre fundações com camadas compressíveis, solos moles ou presença de descontinuidades rochosas não tratadas estão mais sujeitas a instabilidades progressivas. Os autores enfatizam que a ausência de investigações geotécnicas detalhadas ou o desprezo por indicadores geológicos como fraturas, cavidades e presença de materiais expansivos representam fatores de risco estrutural. Um exemplo histórico frequentemente citado é o caso da barragem de St. Francis, na Califórnia, cuja ruptura em 1928 evidenciou falhas graves na avaliação da fundação e na supervisão da execução.

Eventos sísmicos também têm sido objeto de atenção nos estudos de acidentes em barragens. Sayão (2009) observa que a ocorrência de terremotos, mesmo de baixa magnitude, pode induzir deslocamentos internos, fissuras no corpo da barragem e acelerações que desestabilizam os taludes. Para barragens construídas em regiões com atividade sísmica moderada ou intensa, é indispensável a realização de análises dinâmicas e a aplicação de fatores de segurança adicionais durante a fase de projeto. A ausência de tais procedimentos, como demonstrado em vários relatórios de falhas internacionais, pode resultar em rompimentos com consequências irreversíveis.

Por fim, os acidentes decorrentes de falhas operacionais e ações humanas não intencionais ou mal planejadas também devem ser mencionados. Conforme discute Massad (2010), a abertura inadequada de comportas, sobrecarga em componentes hidráulicos, intervenções sem estudos prévios ou manutenção negligente são fatores que agravam as condições de risco em barragens. Em complemento, Sandroni e Guidicini (2022) apontam que incidentes provocados por explosões, sabotagens e ocupações não autorizadas em áreas adjacentes ao reservatório também podem desencadear processos de instabilização. Em muitos casos, a ausência de controle e fiscalização sobre o entorno da estrutura compromete o desempenho esperado da barragem, tornando-a suscetível a degradações externas.

As diversas causas de acidentes em barragens, detalhadas ao longo desta seção, podem ser sumarizadas para uma melhor compreensão. A Tabela 1 ilustra as principais causas de acidentes e rupturas de barragens.

Tabela 1 – Estatística das causas de ruptura de barragens.

Causas da ruptura	%
Problemas nas fundações	40
Vertedouros inadequados	23
Construção deficiente	12
Recalques diferenciais	10
Pressões neutras elevadas	5
Atos de guerra	3
Deslizamento de taludes	2
Materiais deficientes	2
Operação inadequada	2
Terremotos	1

Fonte: USBR Dams and Public Safety (1983) apud PEREIRA (2020, p. 63).

2.6 GEOSSINTÉTICOS

A incorporação de materiais naturais ao solo para aprimorar suas propriedades mecânicas é uma prática milenar, anterior ao desenvolvimento dos materiais sintéticos. Conforme aponta Vertematti (2015), civilizações antigas já utilizavam fibras vegetais resistentes em edificações de grande relevância histórica, como os Zigurates da Mesopotâmia, a Grande Muralha da China e diversas obras do Império Romano.

O cenário tecnológico sofreu uma transformação significativa após a Segunda Guerra Mundial, quando o crescimento da indústria petroquímica e a ampla difusão dos produtos

plásticos viabilizaram a produção de materiais geossintéticos à base de polímeros, destinados a aplicações na engenharia civil (Queiroz, 2016). Enquanto, no exterior, tais materiais já contavam com extensa pesquisa e utilização consolidada, no Brasil sua adoção ocorreu apenas a partir da década de 1970, expandindo-se gradualmente em projetos de infraestrutura.

2.6.1 Geomembranas

As geomembranas enquadram-se na categoria de geossintéticos de baixa permeabilidade, conforme a definição da norma ASTM D4439-14. Trata-se de mantas poliméricas flexíveis, geralmente fabricadas com espessuras variando entre 1,0 mm e 2,5 mm, projetadas para atuar como barreiras hidráulicas (Pierozan, 2014). A permeabilidade desses materiais é consideravelmente inferior à de camadas de solo argiloso compactado, razão pela qual são classificadas como elementos de elevada estanqueidade. A Figura 5 mostra como a geomembrana fica após ser instalada nos taludes e no fundo do reservatório.

Figura 5 – Geomembrana.



Fonte: Techground (s/d).

A principal função das geomembranas é impedir o fluxo de líquidos e gases através do maciço ou da fundação, desempenhando papel essencial em obras que demandam alto controle de percolação.

Além de sua aplicação em barragens de terra, são empregadas em reservatórios de água, canais de irrigação, aterros sanitários, lagoas de contenção, bacias de rejeitos e sistemas de

drenagem, devido à sua resistência química, estabilidade dimensional e durabilidade frente a condições ambientais adversas. A escolha do tipo de polímero (como polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade linear (PEBDL) ou cloreto de polivinila) depende das características do fluido a ser contido, das solicitações mecânicas e das condições climáticas previstas para o projeto (Palmeira, 2018).

O processo construtivo com geomembranas exige cuidados rigorosos na preparação da superfície de apoio, na soldagem das emendas e na inspeção da integridade do material, visto que perfurações ou falhas de união comprometem significativamente sua eficiência. Nesse sentido, a adoção de protocolos de instalação e monitoramento em conformidade com normas técnicas é imprescindível para garantir o desempenho a longo prazo (Araujo, 2021).

De acordo com Das (2013), as geomembranas são produzidas a partir de polímeros termoplásticos ou termofixos e, embora frequentemente classificadas como impermeáveis, apresentam, na realidade, uma condutividade hidráulica extremamente baixa. Ensaio de transmissão de vapor de água indicam valores na faixa de 10^{-12} a 10^{-15} m/s, o que sustenta sua caracterização como materiais “praticamente impermeáveis”. Essa propriedade as torna especialmente adequadas para uso como barreiras hidráulicas em obras geotécnicas, incluindo o controle de percolação em fundações de barragens de terra. Nesses casos, sua função principal é reduzir o fluxo de água através do maciço ou da fundação, contribuindo para a estabilidade estrutural e para a mitigação de riscos associados a gradientes hidráulicos elevados e à erosão interna (*piping*).

A escolha adequada do tipo de polímero, bem como das condições de instalação e proteção mecânica, é essencial para garantir o desempenho e a durabilidade do sistema impermeabilizante.

2.6.2 Geogrelhas

De acordo com a Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – ABMS (2017), as geogrelhas são elementos estruturados em forma de malha, cuja função principal é o reforço. A configuração de suas aberturas permite a interação direta com o material de preenchimento, e sua estrutura é composta por componentes resistentes à tração. Quando apresentam elevada resistência em apenas uma direção, são classificadas como unidirecionais; quando essa resistência se manifesta nas duas direções principais, perpendiculares entre si, são denominadas bidirecionais. Dependendo do processo produtivo, podem ser extrudadas, soldadas ou tecidas.

Reis (2023) descreve as geogrelhas como formadas por um conjunto de elementos lineares interligados em ângulo reto, geralmente produzidos a partir de polímeros como poliamida, poliéster, polipropileno ou polietileno, selecionados de acordo com as exigências mecânicas e de durabilidade do projeto - Figura 6.

Figura 6 – Geogrelhas.



Fonte: Diprotecgeo (s/d).

Segundo Das e Sobhan (2019), o emprego das geogrelhas é versátil e abrange múltiplos contextos na engenharia geotécnica. Entre suas aplicações, destacam-se: o reforço de aterros em estruturas de contenção, a estabilização de taludes, o aumento da capacidade de suporte em camadas de lastro sob ferrovias, a melhoria do subleito em rodovias e ferrovias, e o reforço de fundações rasas sobre solos granulares, contribuindo para o desempenho estrutural e a durabilidade das obras.

2.6.3 Geotêxteis

Os geotêxteis são definidos como materiais têxteis bidimensionais, dotados de permeabilidade e produzidos a partir de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios. Esses componentes podem ser organizados em estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas características mecânicas e hidráulicas permitem o desempenho de múltiplas funções em obras geotécnicas (Araujo, 2021) – Figura 7.

Figura 7 – Geotêxtil



Fonte: Diprotecgeo (s/d).

Graças à sua versatilidade, os geotêxteis podem atuar como elementos de separação, filtração, drenagem, proteção ou reforço, sendo aplicados em projetos como fundações, aterros sobre solos moles, sistemas de drenagem subterrânea, proteção de geomembranas e estabilização de taludes. Sua estrutura permite a passagem controlada de fluidos, ao mesmo tempo em que retém partículas sólidas, prevenindo processos erosivos e o entupimento de drenos (Araujo, 2021).

O desempenho dos geotêxteis está diretamente relacionado à seleção adequada do tipo de fibra, do processo de fabricação e da gramatura, devendo-se considerar fatores como resistência à tração, alongamento, permeabilidade transversal e durabilidade frente a agentes químicos e biológicos presentes no solo ou na água. Dessa forma, a especificação do produto deve estar alinhada às exigências do projeto e às condições ambientais previstas para a obra, garantindo sua eficiência e vida útil.

2.6.4 Georredes

As georredes configuram-se como geossintéticos de estrutura bidimensional, compostos por uma malha regular de elementos poliméricos intersectados, cuja geometria proporciona resistência à tração em múltiplas direções. Diferentemente das geogrelhas, cuja aplicação está prioritariamente associada ao reforço estrutural, as georredes têm função predominante de

drenagem, atuando na condução controlada de líquidos ou gases ao longo de planos horizontais ou inclinados no interior de obras geotécnicas (Koerner, 1994) - Figura 8.

Figura 8 – Georrede



Fonte: Goiás Impermeabilizações (s/d).

Sua fabricação envolve polímeros como polietileno de alta densidade (PEAD), poliéster (PET) ou polipropileno (PP), moldados por extrusão, fusão ou união térmica de filamentos. A conformação tridimensional de sua malha preserva a condutividade hidráulica mesmo sob confinamento, característica essencial em sistemas que demandam drenagem interna controlada, como aterros sobre solos de baixa resistência, obras de contenção e estruturas subterrâneas (Koerner, 1994).

A aplicação das georredes como substitutas parciais ou integrais das tradicionais camadas granulares drenantes apresenta implicações técnicas relevantes. Essa substituição reduz a espessura necessária do sistema, o volume de escavação e a demanda por transporte e extração de materiais naturais, fatores que impactam diretamente o planejamento construtivo e o desempenho hidráulico da obra. Tais características têm favorecido sua adoção em projetos nos quais a otimização do espaço e a eficiência na condução de fluxos são determinantes, como muros de solo reforçado e taludes confinados (Pitanga, 2007).

No âmbito do dimensionamento, destacam-se como propriedades críticas a espessura nominal, a resistência à compressão e a transmissividade hidráulica, esta última definida pela capacidade do material de conduzir fluxo sob pressão normal constante. A determinação da transmissividade em condições específicas de carga e inclinação é realizada por meio de ensaios normatizados, como ASTM D4716 e ISO 12958, fornecendo parâmetros fundamentais para o projeto de sistemas de drenagem em regime permanente (Palmeira, 2018).

As georredes são frequentemente associadas a outros geossintéticos, como geotêxteis, formando sistemas compostos capazes de desempenhar simultaneamente funções de filtração, separação e drenagem. Quando aplicadas de forma isolada, mantêm relevância no controle do fluxo interno, prevenindo o acúmulo de pressões neutras e contribuindo para a estabilidade global da estrutura. A combinação de durabilidade e desempenho hidráulico sustentado ao longo do tempo justifica sua presença em projetos geotécnicos contemporâneos, especialmente em contextos que demandam elevada confiabilidade operacional.

2.6.5 Geocompostos

Os geocompostos representam uma classe multifuncional e tecnologicamente desenvolvida de geossintéticos, definida pela associação planejada de dois ou mais tipos distintos desses materiais, de modo a reunir, em um único elemento, diferentes funções construtivas. As combinações mais recorrentes envolvem geotêxteis, geogrelhas, geomembranas e georredes, originando produtos que podem, por exemplo, unir drenagem e filtração, reforço e proteção, ou impermeabilização e separação (Pitanga, 2007) – Figura 9.

Figura 9 – Geocomposto



Fonte: Toptelhas (s/d).

A principal vantagem na utilização dos geocompostos decorre da interação entre as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos componentes, o que permite satisfazer simultaneamente diversas exigências de projeto, obtendo-se ganhos expressivos em desempenho e racionalização de recursos. Além disso, características como leveza,

maleabilidade e simplicidade de instalação favorecem seu uso em obras de geometria complexa ou em áreas de difícil acesso (Palmeira, 2018).

Entre os tipos mais empregados, destacam-se os geocompostos de drenagem, formados pela combinação de uma georrede com um ou dois geotêxteis posicionados em suas faces, constituindo um sistema capaz de captar, conduzir e filtrar o fluxo de água de forma integrada. Esses elementos encontram aplicação em aterros sanitários, rodovias, túneis, sistemas de contenção e camadas de base ou sub-base de pavimentos. Outro exemplo relevante são os geocompostos bentoníticos, compostos por bentonita confinada entre camadas de geotêxteis, amplamente utilizados como barreiras hidráulicas para contenção de lixiviados ou águas contaminadas, especialmente em obras ambientais e de infraestrutura (Pitanga, 2007).

A escolha e o dimensionamento adequados dos geocompostos requerem a análise criteriosa das propriedades hidráulicas, mecânicas e químicas de cada componente. Ensaio como transmissividade, resistência à tração, capacidade de fluxo sob confinamento e resistência à degradação físico-química e biológica são fundamentais para garantir o desempenho ao longo da vida útil da estrutura. Também devem ser avaliadas a compatibilidade com as condições do local de aplicação e a resistência aos esforços decorrentes do processo de instalação e da movimentação de equipamentos (Koerner, 2022).

A regulamentação do emprego desses materiais tem avançado por meio de normas técnicas emitidas por instituições como ASTM, ISO e ABNT, que estabelecem procedimentos padronizados de ensaio, qualificam fornecedores e asseguram parâmetros mínimos de desempenho. Contudo, a conformidade com as boas práticas de concepção, execução e inspeção continua sendo determinante para a eficiência e a durabilidade dos geocompostos em sistemas geotécnicos.

2.7 TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO

Em barragens, a permeabilidade da fundação tem um papel dominante no fluxo (Cruz, 1996). Por isso, nas barragens em que a fundação é permeável, a análise do fluxo através da fundação assume grande importância. A percolação não controlada pela fundação pode resultar em processos deterioração, comprometendo a segurança da estrutura.

Com a construção de barragens nos mais variados locais, foram sendo criados vários métodos de controle de percolação pela fundação. Dentre esses dispositivos de controle da

percolação, destacam-se as cortinas de injeção, as paredes diafragma e as barreiras impermeabilizantes a montante da barragem.

2.7.1 Trincheiras de vedação

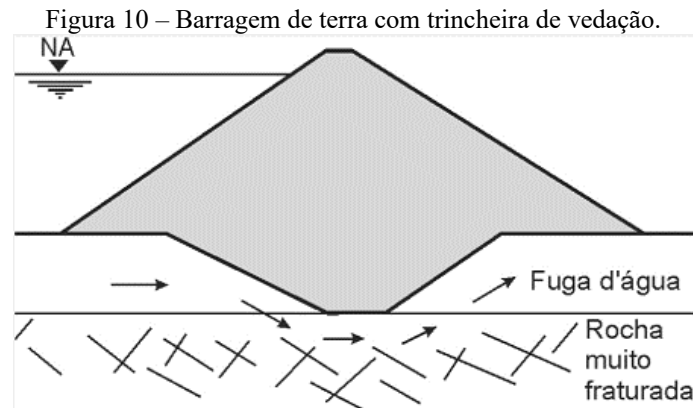
As trincheiras de vedação, também conhecidas como *cut-offs*, são estruturas geotécnicas utilizadas com a finalidade de interceptar ou redirecionar o fluxo subterrâneo de água na fundação de obras hidráulicas. Seu emprego é especialmente indicado quando há necessidade de controle da percolação vertical ou oblíqua que ocorre através de fundações permeáveis ou heterogêneas. Essas trincheiras consistem, geralmente, na escavação de um canal profundo e estreito ao longo do eixo da barragem ou de sua fundação, posteriormente preenchido com materiais de baixa permeabilidade, como argila compactada, solos-bentonita ou calda cimentícia (Massad, 2010; Alcobaça, 2022).

Para Sayão (2009), a principal função das trincheiras de vedação é aumentar o caminho percorrido pelo fluxo de água através da fundação, elevando, com isso, a perda de carga e reduzindo a vazão de percolação. Também atuam na homogeneização das pressões hidráulicas na base da estrutura, contribuindo para a estabilidade global do sistema. O seu dimensionamento depende da profundidade do estrato permeável a ser tratado, da condutividade hidráulica dos materiais adjacentes, do nível do lençol freático e das características geotécnicas da fundação. Em geral, a profundidade da trincheira deve atingir ou ultrapassar a base da camada mais permeável identificada (Sayão, 2009).

De modo geral, as trincheiras podem ser executadas por métodos convencionais de escavação a céu aberto, com uso de escavadeiras hidráulicas, ou, em casos mais complexos, por equipamentos específicos como *grabs*, *hydromills* ou técnicas de parede diafragma. O material de preenchimento deve apresentar alta plasticidade, baixa permeabilidade e capacidade de adaptação volumétrica, garantindo a continuidade da barreira hidráulica mesmo em caso de deformações diferenciais. Em alguns casos, aditivos são incorporados ao solo ou à calda utilizada para melhorar sua estabilidade química e resistência ao intemperismo (Silveira, 2019).

A eficácia das trincheiras de vedação tem sido comprovada em obras de médio e grande porte, sendo recomendadas por manuais técnicos de órgãos internacionais como o ICOLD. No entanto, é necessário ressaltar que sua instalação deve ser planejada e monitorada, especialmente em áreas com presença de lençol freático elevado ou em fundações com presença de blocos rochosos, que dificultam a escavação contínua e a homogeneidade do preenchimento (Alcobaça, 2022). A ausência de integridade na execução pode comprometer seriamente sua

funcionalidade como elemento de vedação. A Figura 10 apresenta em seção uma barragem que utiliza cut-off como tratamento de fundação.



Fonte: Massad (2010).

2.7.2 Cortinas de injeção

As cortinas de injeção são soluções de engenharia destinadas à redução da permeabilidade em solos ou maciços rochosos por meio da introdução de caldas sob pressão em subsuperfície. Essas caldas, compostas geralmente por cimento, bentonita, polímeros ou silicato de sódio, preenchem poros, fraturas, fissuras e cavidades, criando uma barreira hidráulica contínua ou segmentada, capaz de restringir ou redirecionar o fluxo subterrâneo de água. Esse método pode ser aplicado em fundações de obras hidráulicas e geotécnicas, sendo eficaz em rochas fraturadas, solos de elevada porosidade ou fundações heterogêneas (Teixeira Menezes, 2021).

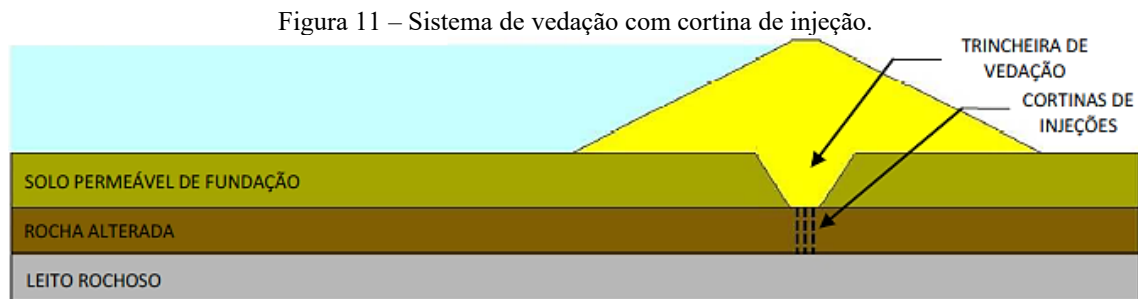
Para Silveira (2019), a execução de uma cortina de injeção inicia-se com o mapeamento geológico e geotécnico detalhado da fundação, seguido da perfuração de furos dispostos segundo um padrão geométrico adequado (normalmente em malha triangular ou retangular). A profundidade e espaçamento entre os furos são definidos em função da extensão da zona a ser tratada e das características hidráulicas do terreno. Posteriormente, a calda é injetada sob pressão controlada, com monitoramento em tempo real da absorção do terreno, permitindo ajustes de pressão e volume conforme a resposta do maciço (Silveira, 2019).

Existem diferentes tipos de cortinas de injeção, como as cortinas simples, múltiplas e contínuas. As cortinas simples são formadas por uma única linha de furos injetados, enquanto as múltiplas utilizam linhas paralelas sobrepostas para garantir maior eficiência de vedação. Já as cortinas contínuas são caracterizadas pelo preenchimento completo da seção desejada, especialmente utilizadas quando há exigência de estanqueidade elevada. A escolha entre essas

tipologias depende do grau de permeabilidade a ser controlado e da função estrutural associada ao tratamento (Massad, 2010).

Os avanços tecnológicos mais recentes permitiram a aplicação de caldas com aditivos que controlam a viscosidade, o tempo de presa e a resistência final, aumentando a durabilidade e a compatibilidade com o meio geológico. Além disso, o uso de instrumentação automatizada nos sistemas de injeção elevou significativamente a precisão do processo, reduzindo o risco de sobrepressurização e garantindo melhor controle do perímetro tratado (Barreto, 2024).

Ainda que as cortinas de injeção apresentem elevado desempenho técnico, sua aplicação exige criteriosa análise de viabilidade técnica e econômica, uma vez que os custos envolvidos podem ser altos, especialmente em fundações profundas ou com geologia complexa. A seleção adequada do tipo de calda, do arranjo dos furos e da metodologia de execução é essencial para garantir a eficácia da solução sem comprometer o cronograma e o orçamento da obra (Barreto, 2024). A Figura 11 indica um esquema de como se apresentam as cortinas de injeção em seção.



Fonte: Pirozan (2014).

2.7.3 Tapete a montante

O tapete a montante é uma técnica de tratamento de fundação aplicada com a finalidade de controlar a percolação de água sob a base de estruturas hidráulicas, por meio da extensão de uma barreira de baixa permeabilidade a partir do paramento montante da estrutura. Essa solução é baseada no princípio de aumentar o caminho percorrido pela água através da fundação, reduzindo assim o gradiente hidráulico e, conseqüentemente, a vazão de percolação. A medida contribui de maneira significativa para a estabilização da fundação e a prevenção de processos de erosão interna, como o *piping* (Cavalcante, 2021).

Para Palmeira (2018), a concepção do tapete a montante pode assumir diferentes formas, variando de simples camadas de solo argiloso compactado a sistemas mais sofisticados com uso de solos-bentonita ou barreiras compostas. Em geral, o tapete se estende por uma distância variável, entre 1 a 3 vezes a altura da barragem, sendo sua espessura e geometria definidas com

base na permeabilidade do solo de fundação, no nível d'água do reservatório e nos parâmetros geotécnicos locais. Quanto mais permeável o solo de fundação, maior tende a ser a extensão horizontal do tapete (Palmeira, 2018).

A execução do tapete a montante demanda atenção à compactação em camadas sucessivas, ao controle de umidade dos materiais e à interface com o terreno natural. A continuidade da barreira ao longo de toda a base da estrutura é um requisito essencial para garantir sua funcionalidade hidráulica. Em alguns casos, o tapete pode ser complementado com elementos verticais de vedação, como trincheiras ou cortinas, formando um sistema integrado de controle de percolação (Campos; Lemos, 2022).

Do ponto de vista hidráulico, o tapete atua distribuindo as cargas hidráulicas e reduzindo os gradientes em profundidade, impedindo o surgimento de trajetórias preferenciais de fluxo. Esse efeito é especialmente importante em fundações com solos estratificados ou com presença de camadas arenosas intercaladas, onde a percolação tende a se concentrar. Ao elevar o comprimento efetivo do caminho de percolação, o tapete promove a dissipação da energia hidráulica e limita a velocidade do fluxo (Teixeira Menezes, 2019).

Silveira (2019) destaca que a manutenção de sua eficácia ao longo do tempo requer cuidados durante a fase de operação da estrutura, sobretudo no que diz respeito à vegetação, erosão superficial e ações de animais escavadores. A inspeção periódica e eventuais ações corretivas devem ser previstas no plano de operação e manutenção da obra, garantindo que o tapete mantenha suas propriedades hidráulicas e estruturais ao longo de sua vida útil (Silveira, 2019). A Figura 12 apresenta, em seção, como fica a configuração de uma barragem que utiliza tapete a montante como método de vedação na fundação.



Fonte: Monteiro *et al.* (2016).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado tendo como estratégia a realização de uma revisão bibliográfica na área da geotecnia, com o intuito de compreender os diferentes tipos de barragem e os principais modos de falha que vem sendo estudados atualmente, além de um estudo de caso visando comparar soluções usuais para um tipo de falha comum: os problemas nas fundações.

A primeira etapa da revisão consistiu na apresentação do panorama histórico das barragens, apresentando os principais conceitos das barragens de terra e enrocamento, além das legislações que tratam da segurança de barragens. Em seguida, foram apresentados conceitos fundamentais da mecânica dos solos para o entendimento dos modos de falha como percolação, gradientes hidráulicos e problemas nas fundações.

Após a devida explicação dos conceitos fundamentais para a compreensão do trabalho, a pesquisa aprofundou-se nos problemas de fundação de barragens, identificando as principais causas de instabilidade e acidentes associadas a essa parte crítica da estrutura. Com base nessa análise, o estudo seguiu para a investigação de possíveis formas de tratamento dessas fundações, focando em soluções que visam mitigar riscos como a percolação excessiva e o levantamento de pressões, preparando o terreno para a avaliação comparativa das alternativas empregadas na prática.

3.1 ESTUDO DE CASO

Após a realização de uma revisão bibliográfica aprofundada sobre barragens, suas tipologias construtivas, os principais fatores que têm ocasionado acidentes e rupturas, bem como os conceitos técnicos indispensáveis à compreensão desta pesquisa, procedeu-se à avaliação comparativa de dois métodos consagrados de tratamento de fundações, com o objetivo de aumentar a segurança e a vida útil dessas estruturas: a aplicação de geomembrana impermeabilizante e a execução de trincheira de vedação (*cut-off*).

As análises de percolação foram conduzidas por meio do software Slide, desenvolvido pela *Rocscience*, reconhecido internacionalmente para estudos de fluxo subterrâneo e estabilidade de taludes. O estudo considerou uma barragem de terra hipotética, cujas

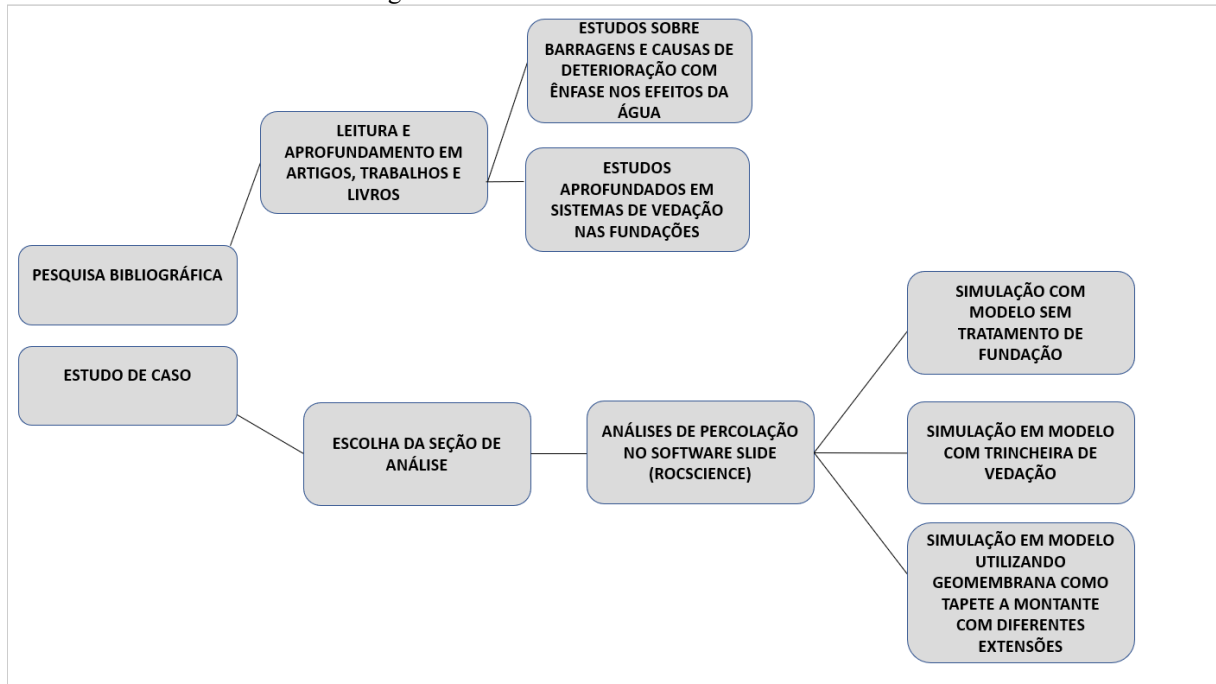
propriedades geométricas e geotécnicas estão descritas nos capítulos a seguir. A geomembrana foi simulada em diferentes comprimentos de extensão na fundação a montante, de forma a avaliar seu impacto sobre a redução de vazão e o controle de pressões neutras. Paralelamente, foi modelado um cenário com a inserção de uma trincheira de vedação contínua, partindo do contato com o maciço e interceptando a camada de maior permeabilidade da fundação, buscando maximizar a interceptação das trajetórias preferenciais de fluxo.

Foram estabelecidos seis cenários de análise: (i) seção de referência, sem qualquer tratamento de fundação; (ii) geomembrana a montante com extensões de 30,0 m, 45,0 m, 60,0 m e 75,0 m; e (iii) trincheira de vedação (*cut-off*) atingindo a camada impermeável. Em cada configuração, avaliou-se a vazão unitária de percolação, a distribuição das linhas equipotenciais e o comportamento dos gradientes hidráulicos, permitindo a comparação quantitativa e qualitativa da eficácia das soluções propostas.

Para garantir uniformidade e comparabilidade entre os cenários, todas as simulações foram realizadas considerando o nível de água do reservatório na cota 105,00 m. Essa padronização assegura que as diferenças observadas nos resultados sejam exclusivamente atribuídas às intervenções modeladas e não a variações nas condições de contorno hidráulicas.

Por fim, todos os resultados obtidos foram confrontados com o cenário de referência, caracterizado pela ausência de qualquer tratamento de fundação. Essa comparação direta possibilitou verificar, de forma objetiva, se cada solução proposta apresenta desempenho consistente na redução da percolação e na melhoria das condições de estabilidade da estrutura em questão. A Figura 13 apresenta o fluxograma com um esquema das atividades realizadas neste trabalho.

Figura 13 – Resumo das atividades realizadas.



Fonte: Autor (2025).

3.1.1 Software Slide

As análises de percolação foram elaboradas utilizando-se do software SLIDE 6.0, da Rocscience Inc.

O programa Slide é amplamente utilizado na engenharia geotécnica, por oferecer múltiplos recursos de análise nos mais variados tipos de estruturas, permitindo ao usuário a criação e edição de modelos complexos com praticidade e rapidez. Ademais, o software permite a consideração de geometrias complexas, diferentes materiais e superfícies de ruptura definidas pelo usuário.

Além das funcionalidades supracitadas, o software se destaca entre os demais programas de análise geotécnica por sua integração fluida entre a simulação de fluxo de água subterrânea (percolação) e a análise de estabilidade de taludes. Essa característica elimina a necessidade da utilização de programas separados ou da importação de dados, pois o ambiente de modelagem de fluxo e a análise de estabilidade são unificados. Dessa forma, o usuário constrói apenas um modelo, garantindo que as análises de fluxo, pressões e gradientes estejam sempre sincronizadas com as condições hidráulicas definidas, simplificando o processo de projeto e interpretação dos resultados (Rocscience, 2017).

3.1.2 Geometria da seção transversal

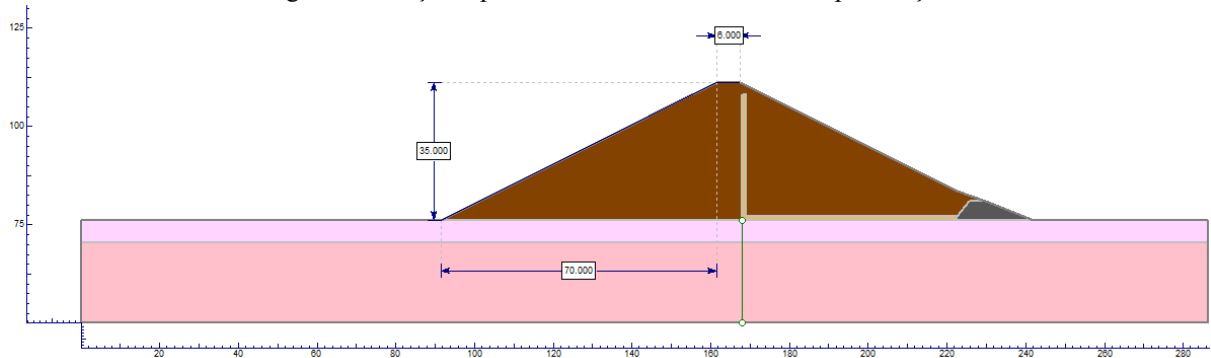
A seção transversal adotada para as análises elaboradas foi uma barragem hipotética homogênea em argila compactada, com altura total de 35,00 metros. A geometria foi definida tendo como base parâmetros frequentemente utilizados em projetos geotécnicos de porte intermediário, buscando garantir representatividade e coerência com os objetivos de pesquisa. A cota de fundação inicia-se na elevação 50,00 metros e vai até a cota 76,00m, enquanto a crista da barragem encontra-se na cota 111,00 metros, resultando em um perfil adequado para as análises de percolação e comparação entre métodos de tratamento na fundação.

A barragem possui 6,00m de largura de coroamento e apresenta taludes de montante e jusante com inclinação de 1V:2H, condição comum em estruturas desse tipo. O nível d'água no reservatório foi definido na elevação 105,00m, o que proporciona um carregamento hidráulico compatível com o porte da barragem e suficiente para provocar fluxos significativos através do corpo e da fundação, além de manter uma borda livre, que é fator crucial de segurança e deve obedecer a critérios estipulados por normas. A configuração inclui um filtro vertical com 32,00 metros de altura, instalado na região central do maciço, que se conecta a um dreno de pé executado em enrocamento, localizado na base do talude de jusante. Essa combinação busca controlar o fluxo de água percolado, reduzindo pressões neutras e promovendo maior estabilidade e segurança à estrutura.

A fundação adotada possui 26,0 metros de profundidade total, sendo composta por duas camadas distintas. A camada superficial, com 5,6 metros de espessura, apresenta maior permeabilidade, o que representa materiais de solo natural pouco coesivos, mais suscetíveis à percolação. Abaixo dessa camada, encontra-se uma formação de menor permeabilidade, simulando um material mais argiloso ou rochoso, com condutividade hidráulica significativamente inferior. Esta estratigrafia foi considerada com o objetivo de avaliar a eficiência dos métodos de vedação ao impedir que o fluxo de água se concentre na interface entre essas duas camadas, situação crítica comumente observada em fundações de barragens de terra.

A geometria definida, juntamente com os parâmetros de permeabilidade adotados para os materiais, permitiu uma comparação eficaz entre os tipos de tratamento de fundação abordados nesse trabalho. A Figura 14 apresenta a seção da barragem hipotética utilizada no estudo de caso.

Figura 14 - Seção hipotética utilizada nas análises de percolação.



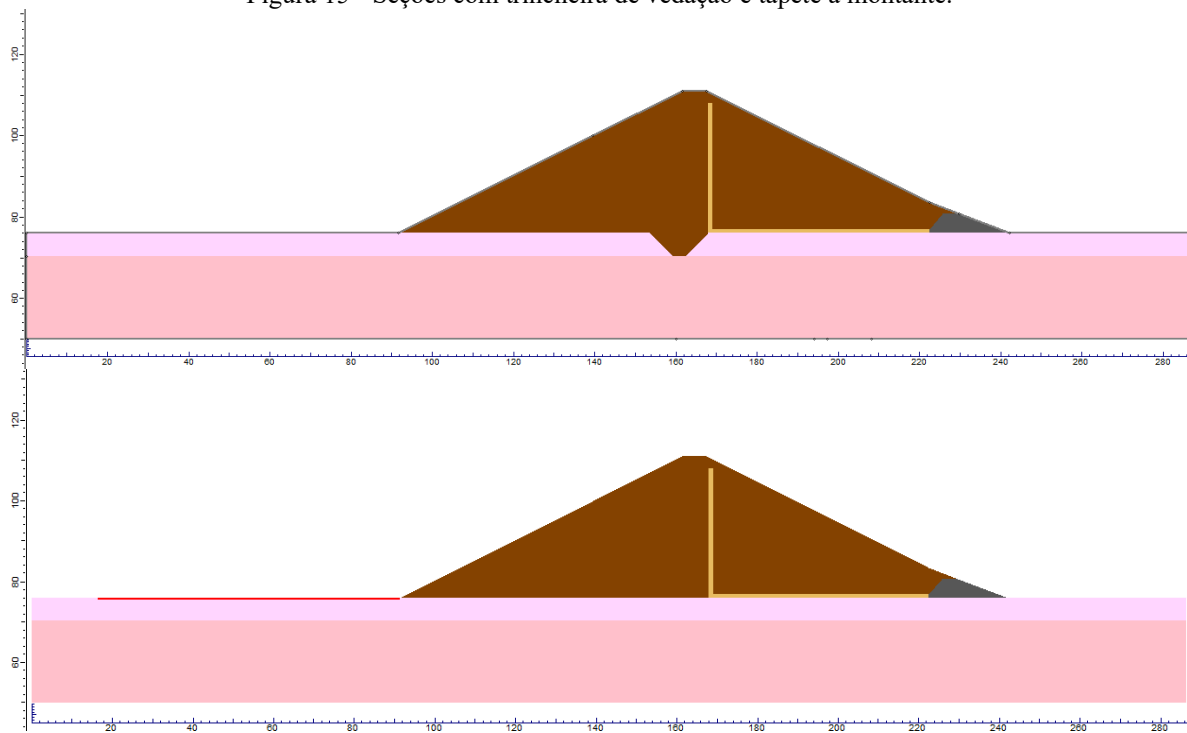
Fonte: Autor (2025).

Após a realização das análises para a condição de referência, correspondente à seção da barragem sem qualquer tipo de tratamento na fundação, procede-se à avaliação das soluções de controle propostas.

Nesta etapa, serão analisados os cenários com a instalação de geomembrana a montante e com a execução de trincheira de vedação (*cut-off*), visando comparar seus desempenhos na redução de fluxo subterrâneo com a configuração inicial.

A Figura 15 apresenta a representação esquemática dessas duas soluções, evidenciando sua disposição na seção transversal e permitindo a visualização das modificações introduzidas em relação à geometria sem tratamento. Essa abordagem comparativa possibilitará quantificar a eficácia de cada medida na redução da percolação e na melhoria das condições hidráulicas no interior do maciço e na fundação.

Figura 15 - Seções com trincheira de vedação e tapete a montante.



Fonte: Autor (2025).

3.1.3 Parâmetros de permeabilidade

A definição dos parâmetros de permeabilidade foi baseada em valores típicos da literatura técnica e em referências adotadas em projetos geotécnicos de barragens de terra. Como o estudo possui caráter hipotético, optou-se por utilizar coeficientes de permeabilidade representativos para cada material modelado, buscando coerência e apoio na literatura para a obtenção de resultados consistentes.

O corpo da barragem foi modelado integralmente em argila compactada. De acordo com Das (2013), as argilas possuem condutividade hidráulica da ordem de $k = 1 \times 10^{-8}$ m/s quando saturada. Diante disso, sabendo-se que o aterro do barramento foi modelado em argila compactada, adotou-se uma permeabilidade de $k = 9 \times 10^{-8}$ m/s para seu maciço, condutividade hidráulica compatível com solos finos e de plasticidade moderada, frequentemente utilizados em maciços compactados com finalidade de retenção.

Para o filtro vertical, constituído de areia, foi atribuída a permeabilidade de $k = 10^{-3}$ m/s já que, segundo Alonso (2018), a permeabilidade das areias varia entre $k = 10^{-3}$ m/s e $k = 10^{-5}$ m/s, a depender de sua granulometria e outros fatores. De forma análoga, Alonso (2018) atribui aos enrocamentos uma permeabilidade $k = 10^{-1}$ m/s, valor este utilizado nas análises. Esses

valores representam permeabilidade mais elevada, já que ambos os materiais são utilizados para condução e dissipação da água percolada.

A fundação foi modelada com duas camadas distintas, refletindo variações no perfil geotécnico típico de áreas naturais. A camada superficial, correspondente aos 5,6 metros iniciais da fundação, recebeu um valor de permeabilidade da ordem de $k = 10^{-5}$ m/s, o que representa um solo com permeabilidade relativamente alta, como areias siltsas ou siltes pouco compactados. Já para a camada inferior, considerada como substrato de baixa condutividade, foi atribuída uma permeabilidade $k = 10^{-10}$ m/s, representando uma formação de solo com permeabilidade extremamente baixa, como em rochas pouco fraturadas, caracterizadas por baixíssima transmissividade hidráulica.

Para Das (2013), embora as geomembranas sejam consideradas impermeáveis, isso não é de fato uma realidade, já que ensaios comprovam que a condutividade hidráulica desse tipo de material está na faixa de $k = 10^{-12}$ m/s e $k = 10^{-15}$ m/s. Diante disso, como o intuito do presente trabalho é estudar a qualidade das geomembranas como material impermeabilizante, foi adotada uma condutividade hidráulica de $k = 10^{-15}$ m/s para esse material com o objetivo de tornar os resultados consistentes.

Com a adoção desses parâmetros, foi possível avaliar, de forma representativa, os efeitos das soluções de vedação propostas no comportamento hidráulico da fundação. Ademais, possibilitou a análise da distribuição dos gradientes hidráulicos e da eficiência de interceptação do fluxo de água pelas geomembranas ou pela trincheira de vedação. Todos os valores supracitados foram inseridos diretamente no software Slide 6.0, assegurando que as simulações refletissem de forma precisa o comportamento esperado para cada condição de permeabilidade e tratamento modelados.

A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os parâmetros de permeabilidade adotados para cada material.

Tabela 2 – Coeficientes de permeabilidade adotados por material.

Material	K (m/s)
Argila	9×10^{-8}
Filtro Vertical	1×10^{-3}
Dreno de pé (Enrocamento)	1×10^{-1}
Fundação 1	1×10^{-5}
Fundação 2	1×10^{-10}
Geomembrana	1×10^{-15}

Fonte: Autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir das simulações de percolação realizadas no software Slide, com o objetivo de avaliar a eficiência de diferentes métodos de tratamentos de fundação aplicados a uma barragem de terra. As análises de percolação foram conduzidas com base na geometria definida no capítulo anterior e foram utilizados os parâmetros de permeabilidade previamente estabelecidos para os materiais do maciço, da fundação e dos elementos de controle de fluxo.

Foram modelados seis cenários distintos: (i) barragem sem qualquer tratamento de fundação, servindo como referência; (ii) aplicação de geomembrana posicionada a montante, com extensões de 30,0m, 45,0m, 60,0m e 75,0m ao longo da fundação; e (iii) utilização de uma trincheira de vedação (*cut-off*), partindo da base do maciço e indo até a camada menos permeável da fundação. Cada uma dessas configurações foi analisada com foco na variação da vazão pela fundação, distribuição das linhas de fluxo e comportamento dos gradientes hidráulicos, permitindo uma avaliação comparativa da eficácia das soluções estudadas.

Os resultados são apresentados a seguir em subtópicos específicos, organizados de acordo com os cenários simulados, de forma a facilitar a interpretação individual de cada caso e a comparação entre os diferentes tipos de vedação na fundação.

4.1 SEÇÃO SEM TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO

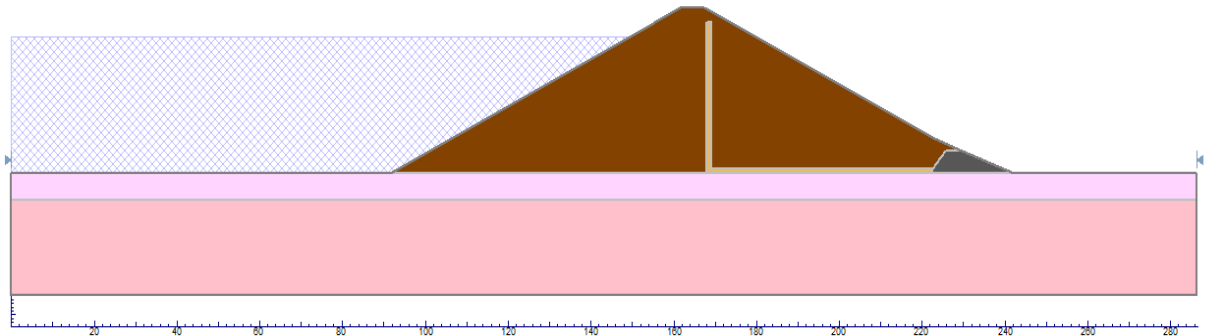
A análise inicial foi realizada para a condição de referência, na qual não há qualquer tipo de vedação ou barreira hidráulica na fundação. Esse cenário tem por finalidade quantificar o comportamento hidráulico natural da barragem e servir como base comparativa para os cenários subsequentes, nos quais serão avaliadas soluções de controle de percolação por meio da instalação de geomembranas com diferentes comprimentos a montante e de trincheira de vedação (*cut-off*).

A geometria padrão da seção transversal foi mantida, considerando-se um corpo de barragem constituído por argila compactada, filtro vertical em areia e dreno de pé em enrocamento. A fundação é formada por duas camadas distintas, sendo a primeira com espessura de 5,6 m, composta por material de permeabilidade relativamente alta, o que favorece

a passagem de fluxo subterrâneo. Os valores de permeabilidade adotados para o corpo, filtro, dreno e camadas de fundação foram os mesmos descritos no capítulo anterior.

A Figura 16 apresenta a geometria da seção e a configuração hidráulica do cenário, sem tratamento, evidenciando o nível de água no reservatório e os principais elementos constituintes da estrutura.

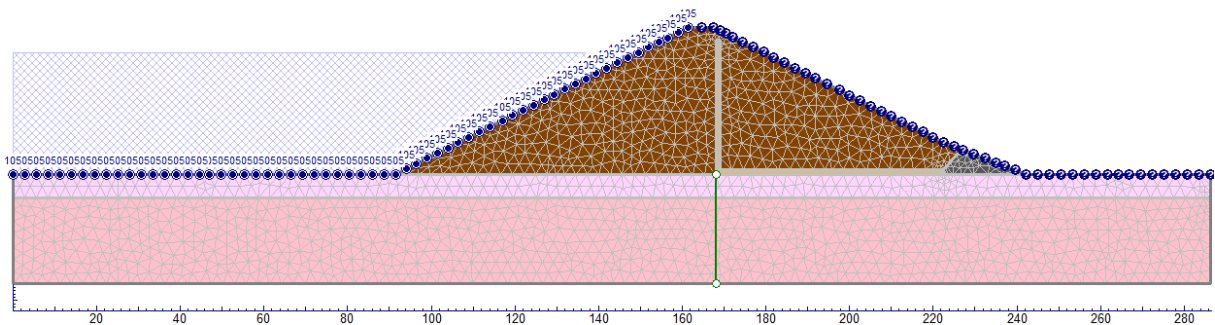
Figura 16 - Seção sem tratamento de fundação.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 17 apresenta as condições de contorno aplicadas às análises numéricas, na qual se destaca o nível de carga hidráulica imposto no reservatório a montante. Além disso, evidencia-se a malha de elementos finitos gerada para a representação da seção transversal, a qual foi refinada nas regiões próximas ao contato entre a barragem e a fundação, de modo a garantir maior precisão na estimativa das pressões neutras e das vazões de percolação.

Figura 17 – Condições de contorno e malha de elementos finitos gerada.



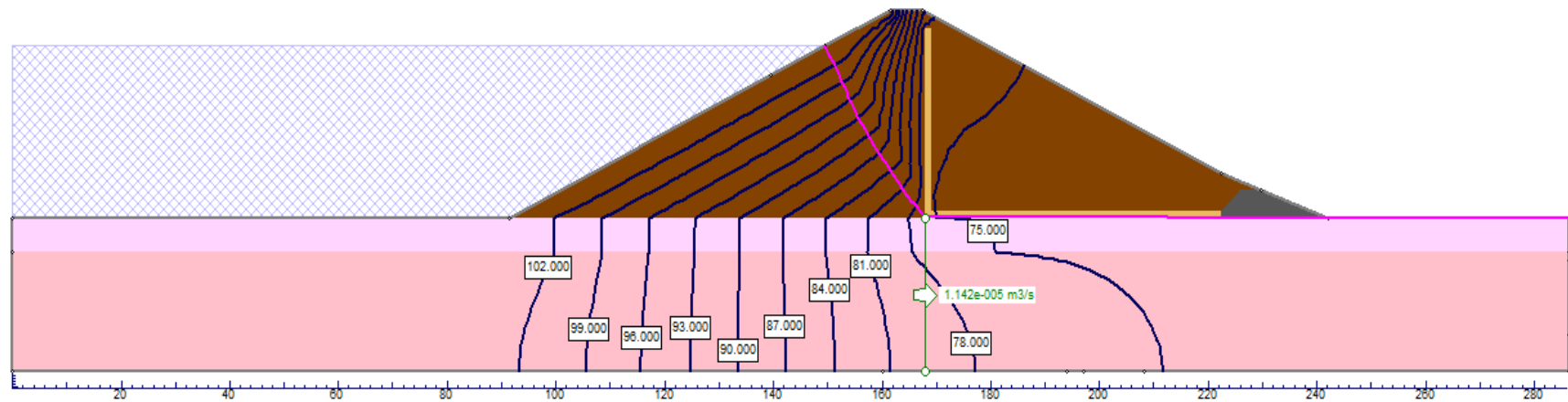
Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos para o cenário sem tratamento de fundação, apresentados na Figura 18, evidenciam o campo de fluxo e a distribuição das linhas equipotenciais ao longo do corpo e da fundação da barragem. As linhas equipotenciais representam pontos de igual carga hidráulica, permitindo observar como a energia do fluxo de água se dissipa no interior da estrutura. Nota-se que, a partir do paramento de montante até o dreno de pé, ocorre a redução progressiva dos valores de carga (de 105,00 m até cerca de 75,00 m), o que caracteriza a perda de carga no sistema.

Essa perda de carga corresponde à energia hidráulica dissipada devido à resistência ao escoamento imposta pelos materiais da barragem e da fundação. Na prática, ela indica a capacidade do maciço e das camadas subjacentes de atenuar o fluxo, sendo maior quanto mais baixa for a permeabilidade do meio atravessado. Entretanto, no presente cenário, a presença da camada superficial da fundação com permeabilidade relativamente alta proporciona um caminho preferencial para o fluxo, favorecendo a passagem de uma vazão considerável.

Figura 18 - Análise sem tratamento de fundação.

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

A análise em questão indica uma vazão de percolação da ordem de $1,14 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro linear de barramento, valor que, apesar de aparentemente baixo, pode ser suficiente para iniciar o carreamento de finos ao longo de tempo, especialmente em solos granulares ou mistos. Esse fenômeno consiste na remoção progressiva de partículas do solo pela ação do fluxo, formando canais internos que reduzem a resistência estrutural da fundação. Considerando-se o comprimento total da barragem, essa vazão unitária deve ser multiplicada pela extensão do eixo para se obter a vazão total percolada, que pode atingir valores significativamente mais expressivos quando analisada para toda a estrutura.

Observa-se ainda que o filtro vertical e o dreno de pé em enrocamento cumprem adequadamente seu papel, captando e conduzindo a água percolada, de forma a manter o nível piezométrico no interior do maciço sob controle. Isso contribui para a redução das pressões neutras e, conseqüentemente, para a estabilidade do talude de jusante.

Esse comportamento hidráulico, caracterizado pela perda de carga e pela trajetória preferencial de fluxo na camada mais permeável de fundação, será utilizado como referência para a avaliação comparativa dos cenários com medidas de vedação da fundação.

4.2 SEÇÃO COM GEOMEMBRANA

O presente item tem por finalidade expor os resultados das análises de percolação realizadas com a adoção de geomembrana instalada na fundação a montante, partindo do pé do barramento. Foram examinadas quatro configurações distintas, nas quais a extensão da geomembrana foi definida em 30 m, 45 m, 60 m e 75m. Em cada subtópico, apresentam-se os resultados correspondentes a cada comprimento estudado, enfatizando a influência da variação da extensão da barreira no controle da vazão de percolação e na redução das poropressões atuantes na fundação.

4.2.1 Geomembrana de 30 metros

Neste cenário, foi inserida uma geomembrana com extensão de 30 metros, posicionada na fundação junto ao paramento de montante da barragem. O objetivo dessa solução é atuar como barreira hidráulica de baixa permeabilidade, reduzindo o fluxo de água proveniente do reservatório e, conseqüentemente, as pressões intersticiais na fundação. Os parâmetros

hidráulicos da geomembrana foram definidos com $K = 1 \times 10^{-15} \text{ m/s}$, valor representativo de materiais poliméricos de elevada estanqueidade.

A análise, apresentada na Figura 18, indica que a instalação da geomembrana resultou em uma redução de aproximadamente 16,27% na vazão percolada pela fundação em relação ao cenário de referência. A nova vazão unitária obtida foi de $9,56 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro linear de barramento, reforçando o efeito positivo da barreira na atenuação do fluxo subterrâneo.

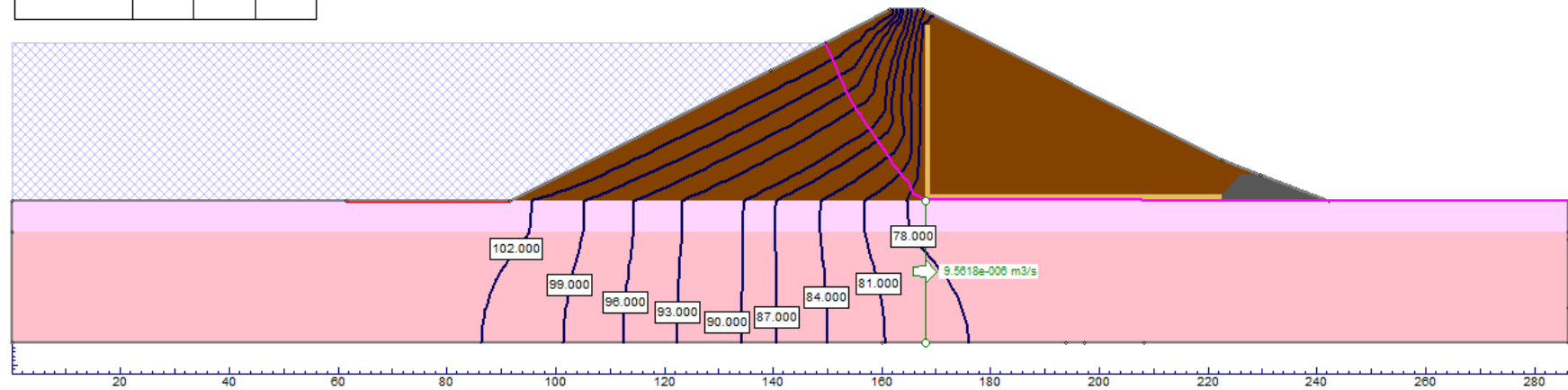
No campo de fluxo apresentado, as linhas equipotenciais representam pontos de igual carga hidráulica, sendo traçados de forma perpendicular às linhas de fluxo. Ao comparar este cenário com o de referência, nota-se que, próximo ao paramento de montante, as equipotenciais tendem a se posicionar de forma mais concentrada e com maior inclinação junto à interface entre a geomembrana e a camada mais permeável da fundação. Essa concentração indica uma redução mais abrupta da carga hidráulica nessa região, reflexo da barreira imposta pela geomembrana. Essa barreira obriga parte da água a buscar caminhos alternativos, desviando para zonas de menor permeabilidade ou aumentando o comprimento do trajeto.

Apesar dessa alteração, observa-se que, logo a jusante da extremidade da geomembrana, as equipotenciais retomam um espaçamento mais uniforme ao observado no cenário inicial, evidenciando que as poropressões na camada permeável ainda permanecem elevadas. Isso ocorre porque a geomembrana cobre apenas parte da camada com maior condutividade hidráulica, permitindo que o fluxo continue a percolar diretamente pela parte não protegida da fundação.

Assim, a configuração analisada mostrou desempenho moderado, servindo como elemento de atenuação, mas não como solução definitiva para o controle da percolação e das pressões neutras na fundação. Esse resultado reforça a importância de considerar a extensão e o posicionamento das barreiras hidráulicas em função das características estratigráficas do local.

Figura 19 - Análise de percolação com geomembrana de 30,0 m a montante.

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Geomembrana		1e-015	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

4.2.2 Geomembrana de 45 metros

Para esta configuração, foi adotada uma geomembrana de 45,0 m. Essa análise teve como finalidade ampliar a proteção contra a percolação em comparação ao cenário com geomembrana de 30,0 m, buscando maior redução da vazão e mitigação das pressões neutras da fundação.

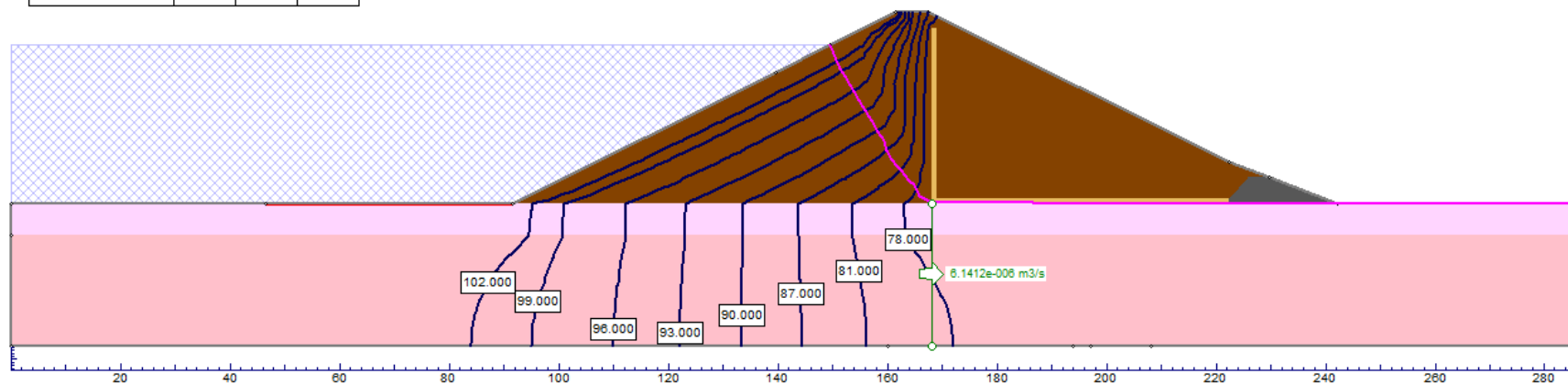
A Figura 19 apresenta as linhas equipotenciais e o nível de água dentro do maciço para a análise neste cenário. As equipotenciais, representativas de pontos de igual carga hidráulica, evidenciam quedas mais acentuadas de carga logo a montante da extremidade da geomembrana. Tal comportamento decorre da barreira imposta pelo material, que interrompe o percurso de fluxo mais direto, obrigando a água a atravessar trajetos maiores ou de menor permeabilidade. Esse redirecionamento do fluxo promove dissipação mais rápida de energia hidráulica nessa região, o que pode ser visualizado pelo maior adensamento das linhas equipotenciais, seguido de espaçamentos gradualmente crescentes à medida que o fluxo se aproxima de jusante.

A vazão unitária de percolação obtida para esta configuração foi de $6,14 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro linear de barramento, correspondendo a uma redução de 46,3% em relação ao cenário de referência, sem tratamento de fundação. Essa diminuição reflete-se também na redução de poropressões na camada de fundação imediatamente a jusante da geomembrana, uma vez que a carga hidráulica transmitida ao solo reduz a pressão intersticial, contribuindo para o aumento da estabilidade global da estrutura.

Apesar da melhoria significativa nos resultados em relação ao desempenho verificado com a geomembrana de 30,0 m, observa-se que uma parcela considerável da camada de fundação de alta permeabilidade permanece em contato direto com a água do reservatório, o que mantém a possibilidade de ocorrência de carreamento de finos e de desenvolvimento de caminhos preferenciais de fluxo ao longo do tempo.

Figura 20 - Análise de percolação com geomembrana de 45,0 m.

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Geomembrana		1e-015	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

4.2.3 Geomembrana de 60 metros

A aplicação de uma camada delgada de geomembrana, com extensão de 60,0 m na fundação a montante do barramento apresentou desempenho expressivo no controle da percolação. Conforme ilustrado na Figura 20, a vazão obtida foi de $3,79 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro de barramento, o que correspondeu a uma redução de 66,83% em relação à seção de referência, sem tratamento. Essa redução decorre da capacidade da geomembrana de atuar como barreira hidráulica, impondo um trajeto mais longo e de menor condutividade para o fluxo subterrâneo, o que eleva a perda de carga e restringe a quantidade de água percolada através da fundação.

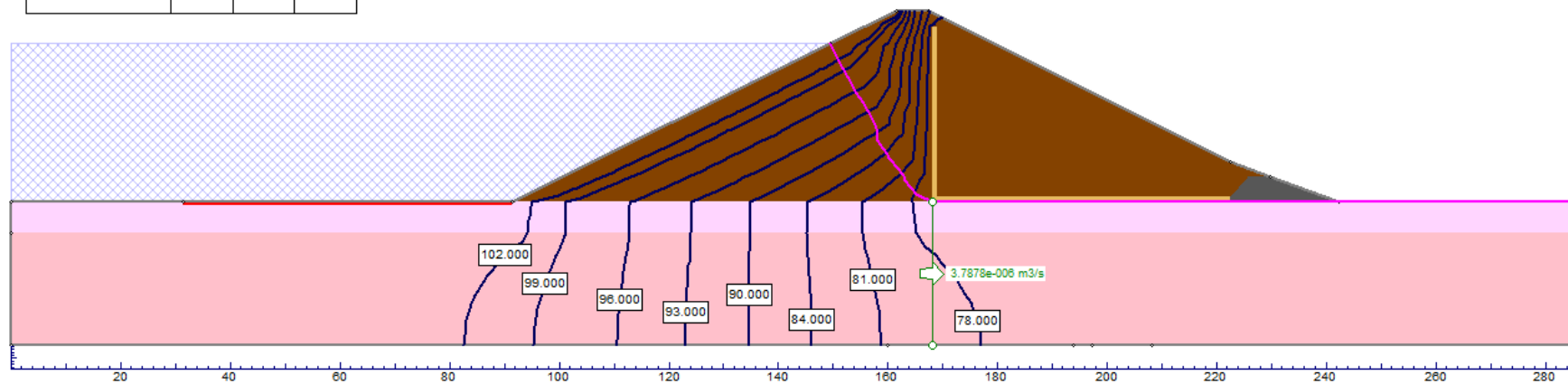
A análise da Figura 20 permite concluir que a instalação da geomembrana provocou o deslocamento da superfície freática para montante, aliado a alterações no arranjo das linhas equipotenciais. Nota-se que essas linhas apresentam maior espaçamento na zona imediatamente a jusante da barreira, o que indica a redução dos gradientes hidráulicos. Tal comportamento é responsável pela diminuição das poropressões na camada de fundação de maior condutividade hidráulica, aspecto essencial para minimizar as tensões internas decorrentes do fluxo e, consequentemente, favorecer a estabilidade do talude de jusante.

A contenção da vazão percolada pela camada delgada impermeável também atua na mitigação de riscos associados ao carreamento de finos e à erosão interna, mecanismos que, quando não controlados, podem originar vazios (*piping*) e comprometer a integridade estrutural do maciço. Ademais, a redução das pressões neutras contribui para evitar recalques diferenciais e preservar a capacidade resistente da fundação frente a solicitações externas.

Ainda que os resultados obtidos sejam positivos, verifica-se que a parcela significativa da fundação com elevada permeabilidade permanece exposta ao contato direto com a água do reservatório. Essa condição sugere que ganhos adicionais poderiam ser alcançados mediante a ampliação da extensão da camada delgada ou pela adoção de soluções complementares, como a execução de um cut-off ou de cortinas de injeção, por exemplo.

Figura 21 - Análise de percolação com geomembrana de 60,0 m.

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Geomembrana		1e-015	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

4.2.4 Geomembrana de 75 metros

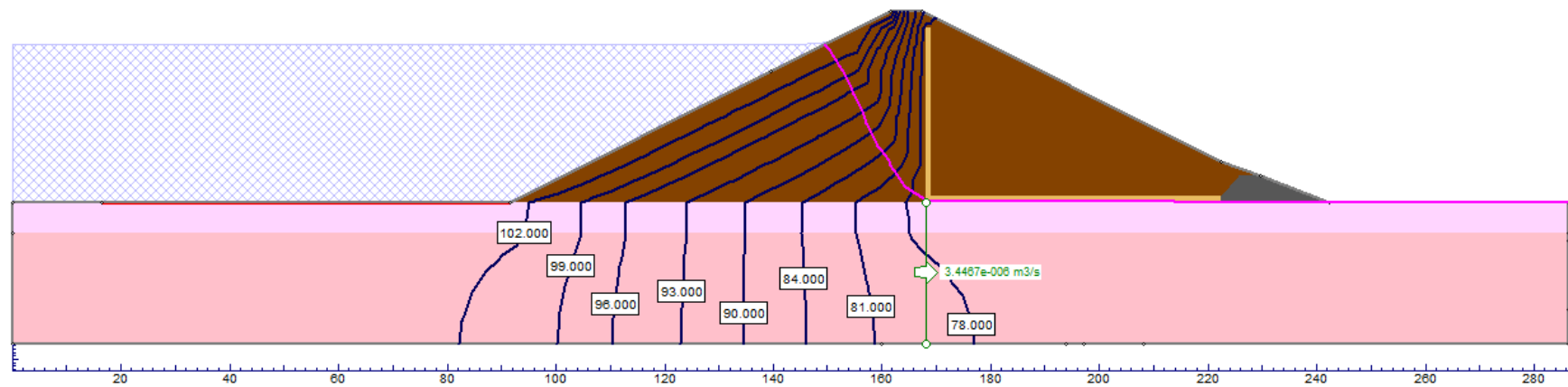
A análise da Figura 21 evidencia que a instalação de uma geomembrana com extensão de 75,0 m na fundação, a montante do barramento, promoveu uma redução da vazão percolada para $3,45 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, representando uma diminuição de 69,82% em relação ao cenário de referência. Essa redução está associada ao reposicionamento da superfície freática para montante e ao consequente alongamento das trajetórias de fluxo, induzindo a dissipação de energia hidráulica e resultando na diminuição dos gradientes hidráulicos e das poropressões na camada de fundação mais permeável.

O desempenho observado no cenário, entretanto, deve ser analisado de forma comparativa com o cenário da geomembrana de 60,0 m, cuja vazão percolada já havia sido reduzida em 66,83% em relação à condição inicial. A diferença percentual de redução entre as extensões de 60,0 m e 75,0 m revela que, a partir de determinada dimensão da camada delgada de baixa permeabilidade, o acréscimo no comprimento instalado tende a gerar ganhos cada vez menores. Esse comportamento é esperado, pois a maior parcela das trajetórias preferenciais de fluxo já se encontra interceptada com a extensão intermediária, restando apenas trajetórias secundárias de menor contribuição hidráulica.

Apesar do efeito de redução adicional ser limitado, a adoção de uma extensão maior ainda proporciona benefícios complementares, como a ampliação da zona de menor poropressão, a mitigação de riscos de carreamento de finos e a redução da probabilidade de ocorrência de *piping*. Contudo, do ponto de vista técnico-econômico, a análise de custo-benefício deve considerar se o incremento de desempenho é suficiente para um aumento no comprimento da geomembrana.

Figura 22 - Análise de percolação com geomembrana de 75,0 m.

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Geomembrana		1e-015	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

4.3 SEÇÃO COM TRINCHEIRA DE VEDAÇÃO (CUT-OFF)

A Figura 22 apresenta os resultados da análise de percolação realizada com o cut-off instalado de forma contínua, ocupando a região central da fundação de permeabilidade considerada alta.

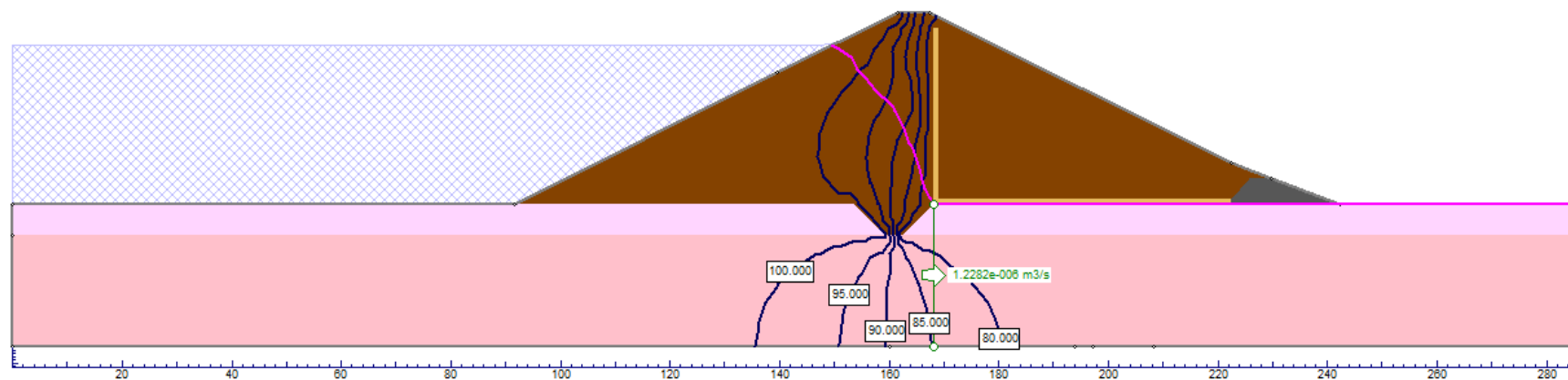
A análise dos resultados apresentados na Figura 21 evidencia que a instalação da trincheira de vedação interceptando a camada mais permeável da fundação resultou em uma vazão percolada de $1,23 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ por metro linear de barramento, representando uma redução de 89,24% em relação ao cenário de referência sem tratamento. Essa redução é a maior dentre as soluções avaliadas, reforçando a eficácia dessa medida na interceptação direta das trajetórias preferenciais de fluxo.

As modificações no campo de fluxo são perceptíveis no reposicionamento e no adensamento das linhas equipotenciais na região central da fundação, imediatamente a jusante do cut-off. Observa-se que as equipotenciais, anteriormente distribuídas de forma mais uniforme, apresentam agora forte concentração junto à barreira, com espaçamento mais reduzido, o que indica uma queda abrupta de carga hidráulica nessa área. Esse comportamento provoca uma redução significativa das pressões neutras (poropressões) na zona interceptada, mitigando riscos de carreamento de finos, erosão interna e piping, além de contribuir para a estabilidade global do talude de jusante.

Por outro lado, a região da fundação a montante do cut-off mantém níveis elevados de poropressão, uma vez que essa solução atua de forma localizada, concentrando seus efeitos na região sob o maciço e a jusante da barreira. Essa condição reforça a importância da associação do cut-off a outros sistemas auxiliares, como filtro vertical e dreno de pé, para controlar a superfície freática dentro do maciço da barragem bem como a utilização conjunta de dois métodos de vedação na fundação, como os tapetes a montante e as trincheiras de vedação.

Figura 23 - Análise de percolação com *Cut-off*.

Material Name	Color	K5 (m/s)	K2/K1
Solo Argiloso		9e-008	1
Filtro Vertical		0.01	1
Dreno de pé (Enrocamento)		1	1
Fundação 1		1e-005	1
Fundação 2		1e-010	1



Fonte: Autor (2025).

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos para cada cenário apresentado nos capítulos anteriores, verifica-se que a instalação de uma geomembrana com extensão de 30,0 metros na fundação resultou na redução de vazão unitária pela fundação de $1,142 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ para $9,56 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, o que representa uma baixa de 16,27% em relação a condição inicial. Ao ampliar-se a extensão da geomembrana para 45,0 metros, a vazão reduziu-se para $6,1412 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, representando uma queda de 46,3%.

Para extensões de 60,0 metros e 75,0 metros, as vazões observadas foram de $3,79 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $3,45 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, equivalendo a reduções de 66,83% e 69,82%, respectivamente, em comparação com o cenário sem tratamento na fundação. O melhor desempenho foi obtido com a adoção da trincheira de vedação (*cut-off*), que resultou em uma vazão de $1,23 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, representando uma redução de 89,31% em relação ao modelo de referência.

A Tabela 3 apresenta o resumo dos resultados obtidos, permitindo visualizar de forma consolidada a eficiência de cada intervenção na redução da percolação pela fundação.

Tabela 3 - Resumo dos resultados de vazão obtidos nas análises.

Condição	Vazão ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	Percentual da vazão inicial
Sem Tratamento	$1,142 \times 10^{-5}$	100%
Geomembrana 30m	$9,5618 \times 10^{-6}$	83,73%
Geomembrana 45m	$6,1412 \times 10^{-6}$	53,7%
Geomembrana 60m	$3,7878 \times 10^{-6}$	33,17%
Geomembrana 75m	$3,4467 \times 10^{-6}$	30,18%
Cut-off	$1,2282 \times 10^{-6}$	10,69%

Fonte: Autor (2025).

A análise comparativa evidencia um comportamento não linear entre o acréscimo de comprimento da camada delgada de baixa permeabilidade e o benefício hidráulico obtido. Embora os incrementos tenham sido uniformes (acrécimo de 15m em cada cenário), os ganhos marginais diminuem à medida que a geomembrana é estendida: o salto de 30 metros para 45 metros é expressivo, de 45 metros para 60 metros, ainda significativo, porém, de 60 metros para 75 metros, o ganho adicional é modesto (apenas 2,99% na redução total), indicando efeito de retornos decrescentes. Esse comportamento é consistente com a interceptação progressiva das trajetórias preferenciais de fluxo: a extensão de 60m já bloqueia a maior parcela do fluxo,

restando caminhos secundários de menor permeabilidade. O Gráfico 1 apresenta um comparativo dos resultados entre todas as soluções propostas para o modelo estudado.

Gráfico 1 - Percentual de redução na vazão em comparação ao cenário referência.



Fonte: Autor (2025).

Do ponto de vista de projeto, esses resultados reforçam a necessidade de avaliação técnico econômica para cada empreendimento. Em particular, deve-se verificar se a redução incremental de vazão proporcionada por um aumento de extensão (por exemplo, de 60 metros para 75 metros) compensa o custo adicional de fornecimento, instalação e proteção da geomembrana, bem como as eventuais exigências construtivas e de manutenção.

Em cenários nos quais se demanda redução mais robusta das pressões intersticiais e do risco de carreamento de finos/*piping*, o *cut-off* pode mostrar-se mais vantajoso técnica e economicamente, sobretudo quando a estratigrafia permite a implantação eficaz da barreira vertical. Entretanto, essa avaliação técnica e econômica depende de outros fatores como custo dos materiais, mão de obra e particularidades de cada projeto como materiais disponíveis para execução da trincheira de vedação, temas que não fazem parte do escopo desse trabalho.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de geomembranas de baixa permeabilidade aplicadas como tratamento de fundação em barragens de terra, utilizando modelagem numérica no software Slide. Para que esse objetivo fosse atingido, diferentes cenários foram analisados. A geomembrana foi modelada com diferentes extensões (30 m, 45 m, 60 m e 75 m) e posicionada na fundação a montante do barramento. Após todos os modelos com o tapete a montante serem analisados, foi realizado o estudo de uma seção utilizando-se de um cut-off impedindo o fluxo por toda a camada mais permeável da fundação. Esses resultados foram então comparados aos obtidos na análise da condição de referência, sem qualquer tipo de tratamento na fundação.

A membrana de baixa permeabilidade age aumentando o caminho de percolação do fluxo na fundação da barragem, o que resulta em menores cargas de pressão e gradientes. Por conseguinte, a vazão pela fundação também reduz de forma significativa.

O desempenho obtido para a geomembrana de 30 metros indicou uma redução de apenas 16,27% da vazão inicial, resultado justificado pelo fato de que a maior parte da fundação de maior permeabilidade permanecia exposta ao contato com a água do reservatório. Ao se ampliar para 45 metros, a redução atingiu 46,3% em relação ao cenário de início, embora ainda uma porção considerável da fundação mais permeável permanecesse desprotegida. Com 60 metros de extensão, a redução alcançou 66,83% e no último incremento, de 60 metros para 75 metros, obteve-se redução de 69,82% em relação ao modelo sem vedação na fundação. Essa redução pouco expressiva no último aumento decorre da presença contínua de uma primeira camada de fundação com alta permeabilidade, que favorece o fluxo de água quando em contato direto com a água.

Apesar disso, verificou-se que a ampliação da geomembrana contribui para o aumento significativo do comprimento dos caminhos de fluxo, favorecendo uma perda de carga hidráulica mais rápida no sentido montante-jusante. Esse efeito é especialmente benéfico para a redução das pressões neutras e gradientes críticos, mesmo quando não se obtém grande redução percentual adicional de vazão. No entanto, em situações nas quais a fundação apresenta materiais com elevada condutividade hidráulica logo abaixo do maciço do barramento, a solução mais eficaz do ponto de vista hidráulico pode ser a trincheira de vedação, que, no presente estudo, proporcionou uma redução de 89,3% na vazão de percolação.

Embora a eficácia do cut-off seja comprovada, sua aplicação deve ser analisada com cautela em cada projeto, considerando fatores como a estratigrafia local, a profundidade necessária para interceptar todas as camadas permeáveis, a viabilidade técnica de execução e os custos associados à instalação e manutenção. Em muitos casos, as limitações construtivas e econômicas podem inviabilizar essa alternativa, fazendo com que soluções como a geomembrana – quando corretamente dimensionada e instalada – se apresente como opção mais adequada.

Os resultados evidenciam que a aplicação da camada delgada de geomembrana pode representar uma solução eficaz para o controle de percolação e para a redução das poropressões na fundação, uma vez que atua como barreira hidráulica, alongando os caminhos de fluxo e reduzindo gradientes hidráulicos. Contudo, observou-se que a relação entre o aumento do comprimento da geomembrana e a redução da vazão de percolação não apresenta proporcionalidade linear, o que evidencia a necessidade de se estudar cada caso em específico para análise adequada de custo-benefício da solução.

De forma geral, esse estudo esclareceu que o uso da membrana como tratamento de fundação é tecnicamente viável para o controle de percolação e redução de pressões intersticiais, desde que o dimensionamento seja realizado com base nas características geotécnicas específicas da fundação. O desempenho dependerá do equilíbrio entre a extensão do tapete, condições construtivas, ganho hidráulico obtido e viabilidade econômica.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o escopo de comparação para incluir outras soluções de impermeabilização, como cortinas de injeção de calda de cimento, que podem apresentar desempenho competitivo em determinados contextos geológicos. Ademais, sugere-se avaliar a aplicação da camada delgada ao longo de todo o talude de montante, com o intuito de avaliar os fluxos por dentro do maciço da barragem. Outra possibilidade é investigar a eficácia de um sistema de geomembrana cobrindo integralmente a interface entre a fundação e a água do reservatório, de modo a eliminar zonas expostas e maximizar a redução das vazões de percolação, sempre ponderando o custo total e a complexidade construtiva em comparação às alternativas tradicionais.

Finalmente, a presente pesquisa contribui para o avanço do conhecimento técnico no dimensionamento e aplicação de barreiras impermeáveis em fundação de barragens de terra, fornecendo subsídios para decisões de projeto mais eficientes, seguros e economicamente viáveis, bem como estabelece uma base para estudos complementares que explorem o equilíbrio ótimo entre desempenho hidráulico, custo e viabilidade de execução.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manual do empreendedor sobre segurança de barragens**. Brasília: ANA, 2016.

ALCOBAÇA, Yuri Matheus Chaves de. **Avaliação de percolação na fundação de barragem construída em região de geologia sedimentar: influência de parede diafragma executada por hidrofresa**. 2022. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

ALONSO, Ulisses. **Rebaixamento temporário de aquíferos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. E-book. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/rebaixamento-temporario-de-aquiferos/p>. Acesso em: 4 ago. 2025.

ARAÚJO, Isis Magalhães. **Análise da aplicação de materiais geossintéticos em fundações de barragens de terra**. 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário Christus – Unichristus, Fortaleza, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028:2017. Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182:2016. Solos — Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BARBOZA, Diones; FLORIANO, Cleber de Freitas. Estudo de percolação em barragens de concreto e terra com base em análises numéricas de fluxo. In: Congresso Brasileiro De Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 20., 2020, Campinas. Anais... Campinas: ABMS, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4322/cobramseg.2022.0653>.

BARRETO, Marcelo de. **Cortinas de injeção - segurança de barragens**. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.28097.98409.

BICALHO, Kátia; MACHADO, Sandro; GERSCOVICH, D. M. S. Condutividade hidráulica e fluxo em solos não saturados. In: **Solos não saturados no contexto geotécnico**. 2015. DOI: 10.4322/978-65-992098-3-3.cap13.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 181, p. 1-3, 21 set. 2010.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 1º out. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/L14066.htm. Acesso em: 8 out. 2025.

BRASIL. **Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966**. Regula o exercício das profissões de engenheiro, arquiteto e engenheiro-agrônomo. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 104, n. 249, p. 12.833, 27 dez. 1966.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos: fundamentos**. 6. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

CAVALCANTE, Gabriel de Oliveira. **Avaliação hidráulica da fundação de uma barragem de terra com tapete impermeável: estudo de caso da barragem Olho d'Água**. 2021. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **A história das barragens no Brasil: séculos XIX, XX e XXI**. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

COSTA, W. D. **Geologia de barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, Paulo de Tarso. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648 p.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

DAS, Braja M.; SOBHAN, Khaled. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução da 8ª edição norte-americana. Tradução: Novartis do Brasil. Revisão técnica: Roberta Boszczowski. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Bulletin on internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations**. Paris: ICOLD, 2017.

KOERNER, R. M. **Design with geosynthetics**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

MARCUZZO, Francisco N. N.; WENDLAND, Edson. Distribuição de pressão em rede de irrigação localizada otimizada por algoritmos genéticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 287-295, mar./abr. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162011000200009>.

MASSAD, F. **Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELO, A. V. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MELO, Amanda Vieira. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. 2014. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MINAS GERAIS. **Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019**. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, dispõe sobre normas de segurança de barragens no Estado e dá outras providências. Diário do Executivo: seção 1, Belo Horizonte, MG, p. 1, 26 fev. 2019. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/>. Acesso em: 8 out. 2025.

MINAS GERAIS. **Decreto nº 48.140, de 23 de março de 2021**. Regulamenta a Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, que institui a Política Estadual de Segurança de

Barragens. Diário do Executivo: seção 1, Belo Horizonte, MG, p. 1, 24 mar. 2021. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/>. Acesso em: 8 out. 2025.

MONTEIRO, F. F.; PIERÓZAN, R. C.; ARAÚJO, A. A. Influência do comprimento de tapete impermeabilizante a montante no fluxo estacionário de barragem de terra com núcleo argiloso. In: ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, 16., 2016, Fortaleza. Anais... Fortaleza: [s. n.], 2016.

PALMEIRA, E. M. Considerações sobre a execução e a interpretação de ensaios de laboratório em geossintéticos. **Geotecnia**, Lisboa, n. 149, p. 3–22, 2018.

PAULO, Felipe Azevedo. **Avaliação do funcionamento hidráulico de descarga de fundo do tipo tubo ranhurado em barragens de pequena altura**. 2019. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2019.

PEREIRA, V. R. G. **Influência da pressão da água intersticial na resistência ao arrancamento de geogrelha em solo coesivo**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Acidentes e rupturas de barragens**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2020.

PIEROZAN, Rodrigo César. **Aplicação de geomembranas em tapetes impermeáveis a montante de barragens de terra**. 2014. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PINHEIRO, Rinaldo J. B.; NUMMER, Andréa Valli; BARONI, Magnos; SCHNEIDER, Ildomar Tavares. Avaliação da condutividade hidráulica das unidades geológico-geotécnicas de Santa Maria (RS) com a utilização de piezômetros. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 1, p. 212-221, 2018. DOI: https://doi.org/10.11137/2018_1_212_221.

PITANGA, Heraldo Nunes. **Caracterização dos comportamentos hidráulico e mecânico de geocompostos bentoníticos e de outros sistemas geossintéticos destinados às camadas de cobertura de aterros sanitários**. 2007. 403 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

REIS, Andressa Nunes. **Aplicações de geossintéticos em barragens de rejeitos**. 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

SANDRONI, S. S.; GUIDICINI, G. **Barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

SAYÃO, Alcimar Soares Ferreira Junior. **Barragens de terra e enrocamento: projeto, construção e segurança**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2009.

SILVEIRA, João Francisco de Almeida. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

TEIXEIRA MENEZES, Teixeira. **Análise de percolação em barragem de terra pelo método dos elementos finitos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA), Palmas, 2019.

UEHARA, K. **Barragens: aspectos técnicos e históricos**. São Paulo: Editora Engenharia, 2005.

VAINER, C. B. Águas para a vida, não para a morte: notas para uma história do movimento de atingidos por barragens no Brasil. In: ACSELRAD, H. (org.). **Justiça ambiental e cidadania**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2003. p. 185–210.

VERTEMATTI, José Carlos (Coord.). **Manual brasileiro de geossintéticos**. 2. ed. atualizada e ampliada. São Paulo: Blucher, 2015.