

# Avaliação de Vazamentos em Geomembranas: Análise Paramétrica Utilizando o Método dos Elementos Finitos

Matheus Cardoso Rabelo

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, matheuscrbh97@gmail.com

Giovanna Monique Alelvan

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Ana Carolina Gonzaga Pires

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, giovannaalelvan@etg.ufmg.br

Rodrigo Cesar Pierozan

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, rodrigopierozan@utfpr.edu.br

**RESUMO:** Os geossintéticos são materiais cada vez mais utilizados em várias áreas da geotecnia e em diversas aplicações. As geomembranas são materiais que apresentam como principal função a barreira ou impermeabilização, de gases ou líquidos, para dentro ou fora de um sistema. Muito utilizadas em obras hidráulicas como aterros sanitários, reservatórios de água e em barragens de terra e concreto. A aplicação de geomembranas em barragens de terra pode ser feita de diferentes formas, sendo uma delas, a sua instalação na face de montante de uma barragem, impedindo a migração de fluxo pelo maciço da estrutura. Entretanto, qualquer geomembrana está sujeita a sofrer danos em sua estrutura, principalmente durante sua instalação, acarretando a possibilidade de vazamentos. Esses vazamentos podem então causar prejuízos econômicos, sociais, ambientais e estruturais, por isso devem ser controlados e estudados. Por esse motivo, para esse estudo foi feita uma modelagem numérica de fluxo, a partir do software Slide2 da Rocscience, para avaliar os danos em uma geomembrana, onde foram variados os coeficientes de permeabilidade do solo, a transmissividade da interface entre a geomembrana e o solo, a dimensão do rasgo e diferentes cargas d'água sobre a geomembrana. Com o estudo paramétrico, foi possível definir que, em linhas gerais, à medida que a permeabilidade do solo aumenta, ocorre a elevação da vazão percolada e da poropressão, em função da presença de rasgos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Geomembranas, vazamentos, danos, análises numéricas.

**ABSTRACT:** Geosynthetics are increasingly used in various areas of geotechnics and in a variety of applications. Geomembranes are materials whose main function is to barrier or waterproof gases or liquids inside or outside a system. They are widely used in hydraulic works such as landfills, water reservoirs and earth and concrete dams. Geomembranes can be applied to earth dams in different ways, one of which is by installing them on the upstream face of a dam, preventing flow from migrating through the structure's massif. However, any geomembrane is subject to damage to its structure, especially during installation, leading to the possibility of leaks. These leaks can then cause economic, social, environmental and geotechnical damage, which is why they must be controlled and studied. For this reason, numerical flow modeling was carried out using Rocscience's Slide2 software to assess the damage to a geomembrane, varying the permeability coefficients of the soil, the transmissivity of the interface between the geomembrane and the soil, the size of the tear and different water loads on the geomembrane. With the variations in the analyses, it was possible to define, in general terms, that as the permeability of the soil increases, there is a corresponding increase in the percolated flow, resulting in higher values of flow and pore pressure measured in the region of the tear.

**KEYWORDS:** Geomembranes, leaks, damage, numerical analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

As geomembranas são materiais poliméricos empregados na engenharia com o intuito de conter o fluxo de líquidos e evitar sua perda por infiltração, ou seja, desempenhar a função de barreira de fluxo entre dois meios. As geomembranas são vastamente empregadas em obras geotécnicas, hidráulicas e de proteção como elemento de impermeabilização, bloqueando a migração de fluídos, líquido ou gasoso, para dentro ou fora de um determinado sistema.

Cazzuffi (2010) aponta que até o ano de 2010 foram construídas ou preparadas 260 grandes barragens contendo geomembranas flexíveis como sistema de barreira. As geomembranas poliméricas flexíveis possuem permeabilidades extremamente baixas, na ordem  $1,00 \cdot 10^{-10}$  e  $1,00 \cdot 10^{-13}$  m/s. Destaca-se que quando a geomembrana é instalada no paramento de montante de barragens de aterro, elas podem eventualmente ficar expostas. Dessa forma, encontra-se mais vulneráveis as solicitações durante o seu tempo de vida útil, o que pode reduzir o seu tempo de utilização.

Entretanto, assim como qualquer obra que envolva algum tipo de barreira, existe a possibilidade de vazamento advindos de danos mecânicos no processo de instalação e/ou operação da estrutura, sendo, portanto, necessário estabelecer controle sobre o vazamento. Os vazamentos podem ser potencialmente prejudiciais por várias razões, sendo perdas econômicas, danos ambientais, danos percebidos, danos geotécnicos e danos nos revestimentos. Giroud & Bonaparte (1989) mencionam que todos os revestimentos vazam. Giroud (2016) complementa que reconhecer que todo revestimento pode ter vazamento é o primeiro passo para a segurança de uma obra.

Cardona (2013) estudou os efeitos dos danos em geomembranas em obras hidráulicas por meio de ensaios de laboratório, com intuito de medir a vazão que passa através de geomembranas com danos mecânicos. Foram ensaiadas geomembranas de PVC com 1 mm de espessura com danos lineares com comprimentos entre 5 mm e 50 mm foram provocados nas amostras. Os resultados obtidos mostraram que o tipo de mecanismo provocador do corte e a pressão aplicada no sistema influenciam a intensidade de vazamento pelo dano. Variações de temperatura e consequentes deformações na geomembrana também podem influenciar a intensidade e o padrão de vazamento pelo corte.

Camargos (2010), realizou um estudo de análise numérica de vazamentos através de danos em geomembranas em que foram avaliadas diferentes condições de barreiras hidráulicas assim como diferentes metodologias, sendo modelagens numéricas, soluções empíricas, soluções analíticas e resultados experimentais. Os resultados mostraram que o aumento do diâmetro do dano, o aumento da carga hidráulica sobre a geomembrana e a piora na condição de contato, tendem a aumentar o vazamento através de danos em geomembrana. Além disso, foi possível verificar a acurácia das equações empíricas e analíticas, por meio da comparação dos resultados obtidos pelas equações com os resultados numéricos. A transmissividade de interface mostrou-se ser um parâmetro de grande influência nos vazamentos, sendo dependente principalmente do coeficiente de permeabilidade do solo e condição de contato entre solo e geomembrana.

Para avaliar a vazão através de danos em Geomembrana, Giroud & Bonaparte (1989b) definiram soluções analíticas para a quantificação dos vazamentos. Sabe-se por estudos de Giroud, que ocorre uma transmissividade de interface entre a geomembrana e o solo. Ambas as equações, de vazão e transmissividade da interface, são importantes para as análises de fluxo numéricas a serem realizadas no estudo em questão.

Diante do exposto, este trabalho tem por finalidade avaliar o comportamento de uma geomembrana PEAD (Polietileno de Alta Densidade) como elemento de vedação na face de montante de barragens de terra. Por meio de análises numéricas paramétricas, utilizando o Método dos Elementos Finitos, avaliou-se a influência dos parâmetros do solo e da interface entre a geomembrana nas variáveis resposta de fluxo na região danificada.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em uma avaliação numérica paramétrica de fluxo considerando um modelo que simula uma geomembrana danificada com um rasgo. Para isso, fixou-se o tamanho do rasgo em 20 mm, a espessura da geomembrana em 5 mm, a permeabilidade da geomembrana em  $1,00 \cdot 10^{-12}$  cm/s e a espessura da interface de 1 mm. Avaliou-se então três valores de permeabilidades para o solo ( $K_s$ ) adjacente (de 15 metros de comprimento e 5 de altura), três valores de transmissividade da interface determinadas por metodologias analíticas e três valores de carga hidráulica. A Tabela 1 apresenta o resumo das análises conduzidas.

Tabela 1. Modelos paramétricos de fluxo.

$K_s$ Solo (m/s)	$K_s$ Geomembrana (cm/s)	Espessura da Geomembrana (mm)	Espessura da Interface (mm)	Transmissividade da Interface ( $\Theta$ )	Tamanho do Rasgo (mm)	Carga d'água (m)
$1,00 \cdot 10^{-03}$	$1,00 \cdot 10^{-12}$	5,00	1,00	$1,28E-04$	20,00	20,00
						40,00
						60,00
$1,00 \cdot 10^{-06}$				$1,075E-08$	20,00	20,00
						40,00
						60,00
$1,00 \cdot 10^{-09}$				$6,49E-09$	20,00	20,00
						40,00
						60,00

A transmissividade da interface foi calculada utilizando as equações empíricas definidas por Touze-Foltz e Giroud (2003) para calcular a taxa de fluxo através de revestimentos compostos devido à danos em geomembrana. No mesmo estudo, foram apresentadas equações para o cálculo da transmissividade de interface entre o solo e a geomembrana. Para essa pesquisa em questão, foi considerada apenas a equação para uma condição na qual os autores classificam como excelente, nos testes iniciais e como boa, nos modelos finais.

As equações para as seguintes condições, excelente e boa, perspectivamente, são:

$$\log \theta = -1,7476 + 0,7155 \log K_s \quad (1)$$

$$\log \theta = -1,3564 + 0,7155 \log K_s \quad (2)$$

onde  $K_s$  refere-se ao coeficiente de permeabilidade do solo

A condição tratada pelos autores como excelente, é correspondente a uma geomembrana instalada sem rugas, sobre um componente de solo de um revestimento composto, sendo um geocomposto de bentonita, instalado sobre uma camada de solo de baixa permeabilidade que foi adequadamente compactada e possui uma superfície muito lisa. Além disso, é assumido que existe uma pressão compressiva suficiente para manter a geomembrana em contato com o geocomposto.

Já a condição considerada como boa, corresponde a uma geomembrana instalada com o mínimo de rugas, sobre uma camada de solo de baixa permeabilidade que foi adequadamente compactada e possui uma superfície lisa. Além disso, assume-se que existe uma pressão compressiva suficiente para manter a geomembrana em contato com o solo.

A análise foi conduzida no software Slide2 utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Uma malha triangular foi criada para esse modelo foi elaborada a partir da ferramenta “Discretize and Mesh”, a qual discretiza as fronteiras do modelo e cria a malha automaticamente em duas dimensões. Assim, para conseguir resultados mais precisos na região do rasgo, foi realizado um refinamento nesta região, totalizando 17890 elementos no modelo, sendo 1500 na região do rasgo. Como condição de contorno foram definidas cargas totais (*total head*) para simular as variações de carga d'água estudadas e a condição de pressão zero (*zero pressure*) na base do modelo para permitir o fluxo pela região do dano. A Figura 1a indica a malha final refinada na região do rasgo e a Figura 1b as condições de contorno definidas.

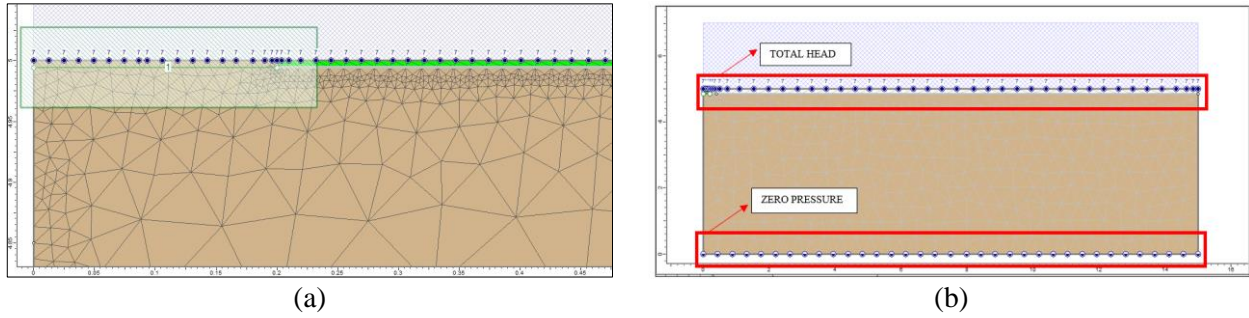


Figura 1. Refinamento da malha na região do rasgo.

### 3 RESULTADOS

Os resultados obtidos nas análises numéricas para vazão e poropressão no rasgo e vazão no fundo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados considerando geomembranas com espessura de 5 mm, interface de 1 mm e rasgo de 20 mm, condição excelente.

Ks Solo (m/s)	Transmissividade da Interface ( $\Theta$ )	Tamanho do Rasgo (mm)	Carga d'água (m)	Vazão no Rasgo ( $m^3/s$ )	Vazão no fundo ( $m^3/s$ )	Poropressão no rasgo (kPa)
$1,00 \cdot 10^{-3}$	$1,28 \cdot 10^{-4}$	20,00	20,00	$4,90 \cdot 10^{-3}$	$5,53 \cdot 10^{-3}$	180,00
			40,00	$9,00 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$	365,00
			60,00	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	550,00
$1,00 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$	20,00	20,00	$4,77 \cdot 10^{-6}$	$5,61 \cdot 10^{-6}$	180,00
			40,00	$8,75 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	365,00
			60,00	$1,27 \cdot 10^{-5}$	$1,50 \cdot 10^{-5}$	550,00
$1,00 \cdot 10^{-9}$	$6,49 \cdot 10^{-9}$	20,00	20,00	$2,91 \cdot 10^{-9}$	$3,90 \cdot 10^{-8}$	180,00
			40,00	$5,20 \cdot 10^{-9}$	$7,06 \cdot 10^{-8}$	365,00
			60,00	$7,56 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-7}$	550,00

A Figura 2 e Figura 3 ilustram, para o primeiro caso, a poropressão no modelo e com mais detalhes na região do rasgo, respectivamente.

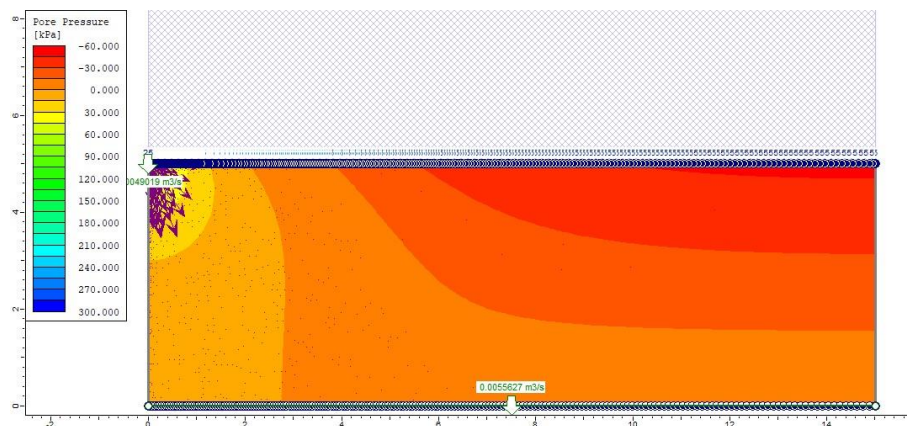


Figura 2. Resultados de poropressão para carga d'água de 20 m e permeabilidade do solo de  $1,00 \cdot 10^{-3}$  m/s.

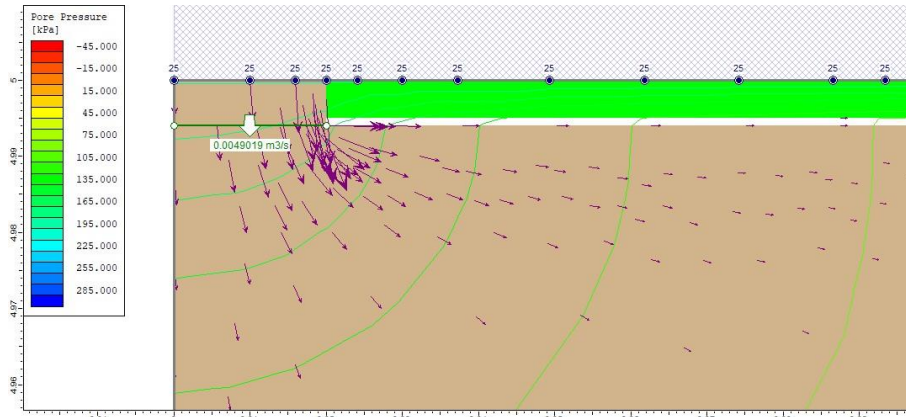


Figura 3. Detalhe na região do rasgo para carga d'água de 20 m e permeabilidade do solo  $1,00 \cdot 10^{-3}$  m/s.

Já na Figura 4 e Figura 5 são apresentados os mesmos resultados para o caso de menor permeabilidade e maior carga hidráulica.

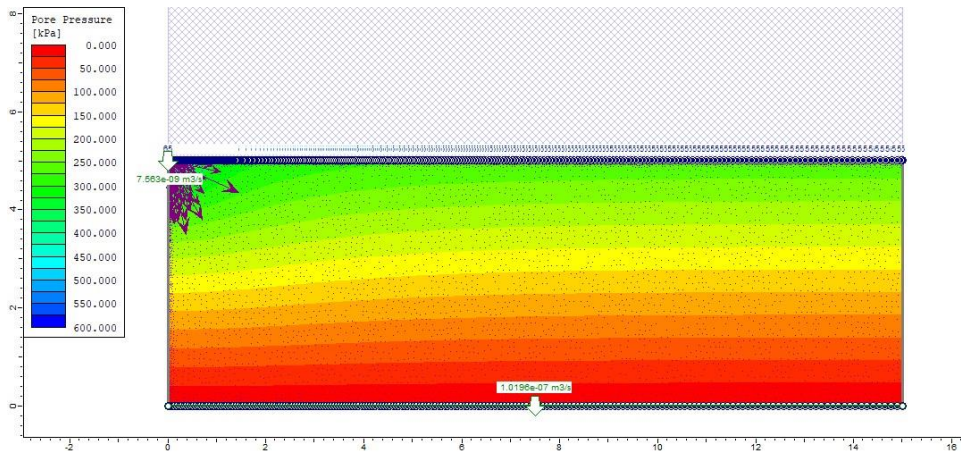


Figura 4. Resultados de poropressão para carga d'água de 60 m e permeabilidade do solo de  $1,00 \cdot 10^{-9}$  m/s.

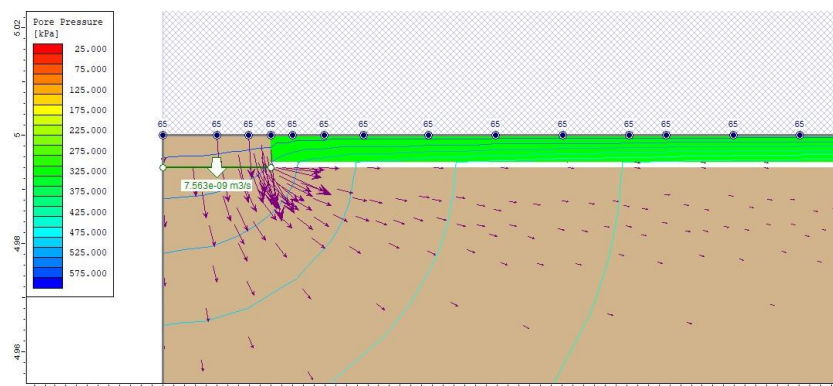
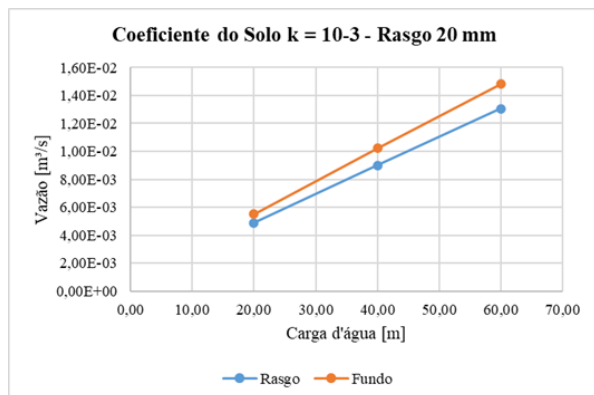


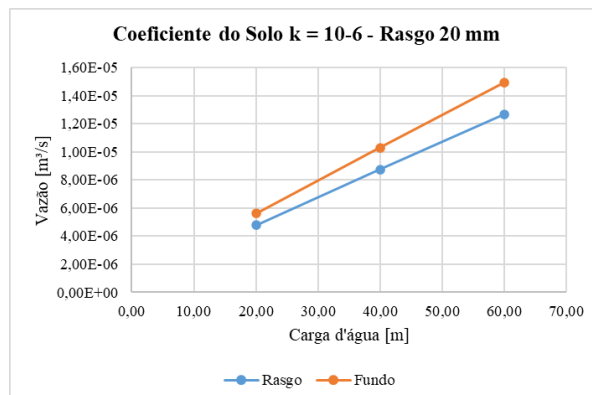
Figura 5. Detalhe na região do rasgo para carga d'água de 60 m e permeabilidade do solo  $1,00 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Para as condições estabelecidas e para o solo de coeficiente de permeabilidade a  $1,00 \cdot 10^{-3}$  m/s nota-se que a vazão aumenta de  $4,90 \cdot 10^{-3}$  m/s na carga d'água de 20 m para uma vazão de  $1,31 \cdot 10^{-3}$  m/s quando se tem uma carga d'água de 60 m, indicando um o aumento de vazão de 62%. Além disso, percebe-se também que a vazão passa a sofrer mudanças significativas em relação ao rasgo e ao fundo do modelo. Contudo, a poropressão permanece com a tendência de ser muito alta na região do rasgo e aumenta à medida que a carga d'água aumenta.

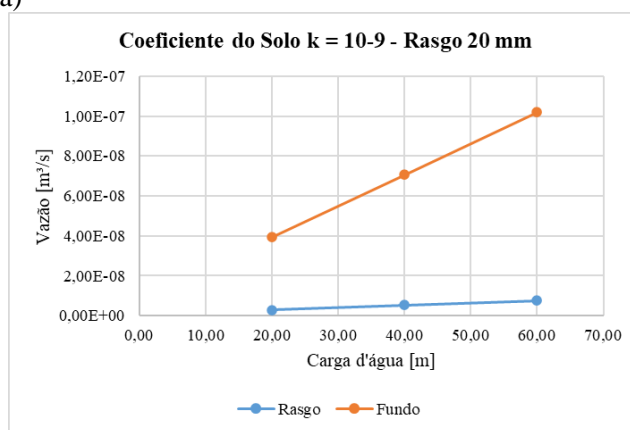
Nas Figura 4 são apresentadas as relações entre a vazão no rasgo e de fundo do modelo com a carga hidráulica para os três valores de permeabilidade, respectivamente. Em todos os casos percebe-se uma relação crescente linear.



(a)



(b)



(c)

O solo de coeficiente de permeabilidade de  $1,00 \cdot 10^{-9}$  m/s, com a mudança da carga d'água de 20 m para 60 m, a vazão na região do rasgo aumentou de  $2,91 \cdot 10^{-9}$  m/s para  $7,56 \cdot 10^{-9}$  m/s, mantendo-se o aumento de vazão de aproximadamente 62%.

#### 4 CONCLUSÕES

Este artigo teve como objetivo a proposição de um modelo numérico que simulasse as condições de fluxo por uma geomembrana danificada por um rasgo. Para isso foi criada uma geometria que associa o geossintético ao solo por meio de uma interface, com valor de transmissividade calculado analiticamente por meio de métodos empíricos.

Os resultados das análises paramétricas indicam que há relação direta entre o aumento da carga hidráulica e os valores de vazão e poropressão na região do rasgo. Além disso, foi possível quantificar os impactos da variação do coeficiente de permeabilidade do solo nos valores medidos.

É interessante observar que, como o cálculo da interface solo-geomembrana depende da permeabilidade do solo, o valor obtido é sempre inferior a permeabilidade do solo. Isso é importante para que no modelo numérico o fluxo seja direcionado principalmente para o solo, e não apenas para a interface.

Em todos os casos observa-se uma concentração de fluxo na fronteira entre o rasgo e a interface, o que poderia induzir ao aumento do dano na geomembrana. Este fenômeno é principalmente importante para os solos de menor permeabilidade, onde constata-se maiores valores de vazão associados a maiores valores de poropressões.

Como sugestão para estudos futuros, sugere-se simular modelos de geometrias reais e conduzir retroanálises de casos documentados na literatura de danos em geomembranas em estruturas geotécnicas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a Universidade Federal de Minas Gerais, a CAPES e ao CNPq pelo apoio e fomento a pesquisa.

## 5 REFERÊNCIAS

- CARDONA, L. I. D. (2013). *Estudo de fluxo através de danos mecânicos em geomembranas. Dissertação de Mestrado*, Publicação G.DM-230/13, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 73 p.
- CAMARGOS, C.S. (2022). *Análise numérica de vazamentos através de danos em geomembranas. Dissertação de Mestrado*, Publicação G.DM-345/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 111 p.
- CAZZUFFI, D. A., GIROUD, J. P., SCUERO, A. & VASCHETTI, G. (2010). *Geosynthetic barriers systems for dams. 9th International conference on geosynthetics*, Guarujá, Brasil, Vol. 1, p. 115-163.
- COLMANETTI, J. P. (2006). *Estudos sobre a Aplicação de Geomembranas na Impermeabilização da Face de Montante de Barragens de Enrocamento*, Publicação n° G.TD-037/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 272 p.
- GIROUD, J. P. (2016). *Leakage Control using Geomembrane Liners*. *Soils and Rocks*, São Paulo, 39 (3): 213-235
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). *Leakage through Liners Constructed with Geomembranes*, Part I: Geomembrane Liners. *Geotextiles & Geomembranes*. v. 8, n. 1, p. 27-67.
- GIROUD, J.P. & BONAPARTE, R. (1989). *Leakage through Liners Constructed with Geomembranes*, Part II: Composite Liners. *Geotextiles & Geomembranes*. v. 8, n. 2, p. 71- 111.
- TOUZE-FOLTZ, N. & GIROUD, J. P. (2003). *Empirical equations for calculating the rate of liquid flow through composite liners due to geomembrane defects*. *Geosynthetics International*, 10, n. 6, p. 215–233.