

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Geomembrana no Talude de Montante de Barragens: Avaliação de Possível Influência no Processo de Galgamento

João Pedro de Paula

Graduando, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, joaopedrodepaula23@gmail.com

Aloysio Portugal Maia Saliba

Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, asaliba@ehr.ufmg.br

RESUMO: O presente trabalho tem como tema geomembranas empregadas no talude de montante de barragens como sistema de impermeabilização. O objetivo do estudo foi avaliar uma possível influência da geomembrana no desenvolvimento da brecha em um processo de galgamento. A princípio é apresentada uma breve contextualização sobre as barragens de disposição de rejeitos de mineração e geomembranas, que podem ser empregadas nos sistemas de impermeabilização dessas estruturas. Logo depois é descrito o processo de galgamento e como as barragens de aterro se comportam sob sua ocorrência. É proposta então uma metodologia para avaliação do desempenho da geomembrana no talude de montante quando a barragem sofre o processo de galgamento. A metodologia é aplicada num estudo de caso com quatro cenários que variam em relação às proporções de desenvolvimento da brecha. Os resultados da aplicação da metodologia são discutidos em seguida, e aspectos da metodologia e das premissas adotadas também são analisados. Por fim, conclui-se que as geomembranas romperiam sob o processo de galgamento e, portanto, nenhuma contribuição do material deve ser contabilizada em estudos de ruptura hipotética que serão base para o desenvolvimento de planos de mitigação de danos.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Aterro, Geomembrana, Galgamento, Geomembrana no Talude de Montante.

ABSTRACT: Resumo do artigo na língua inglesa seguindo as mesmas regras do RESUMO em português.

KEYWORDS: Earthfill dam, Geomembrane, Overtopping, Geomembrane on the Upstream Slope.

1 Introdução

Os recentes casos de rompimento de barragens de rejeito em Minas Gerais provocaram grandes alterações na legislação e no mercado derivado das operações de mineração. Existe atualmente grande demanda por obras e serviços de consultoria técnica que visam a garantia da segurança de barragens já construídas e em construção. Neste mesmo contexto, a demanda por soluções de mitigação de danos também é crescente e exige estudos aprofundados sobre cenários de ruptura de barragens. Portanto, é de fundamental importância a avaliação de quaisquer elementos que exerçam ganhos ou perdas para a segurança das barragens e principalmente das pessoas possivelmente afetadas.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar possível influência do sistema de impermeabilização de uma barragem, composto por geomembrana no talude de montante, no processo de galgamento.

2 Barragens de Rejeito e Geomembranas

As atividades de exploração de uma mina têm como objetivo a extração de um material que possui valor econômico, o minério. Porém, o minério no estado em que é extraído da jazida não se caracteriza como produto comercializável, pois junto a ele também são extraídos outros materiais que não possuem valor econômico. Para que seja comercializado, o minério deve passar pelo processo de beneficiamento que visa justamente separá-lo dos demais materiais, os rejeitos.

Os rejeitos são materiais que não possuem finalidade de consumo e, portanto, são devolvidos ao meio ambiente. Porém, estes materiais podem apresentar risco de contaminação aos solos e rios, pois passam por



processos químicos durante o beneficiamento, e devem ser armazenados em local seguro. Para atender a esta necessidade, são construídas estruturas de armazenamento próximas às minas, as barragens de rejeito. Para o caso dos processos de beneficiamento que geram rejeitos contaminados, exige-se maior cuidado com o armazenamento destes materiais e, a fim de se minimizar os impactos ambientais, adota-se sistemas de impermeabilização nos reservatórios das barragens.

Para composição dos sistemas de impermeabilização pode-se empregar materiais sintéticos compostos por polímeros, os geossintéticos. Segundo Geroto (2008), os geossintéticos mais utilizados em sistemas de impermeabilização são a geomembrana e os geocompósitos, que apresentam baixa condutividade hidráulica e elevadas resistências químicas e físicas. Conforme descrito por Soto (2015), as geomembranas são as mais aplicadas a este tipo de uso devido à sua facilidade de uso, pequena espessura, baixo coeficiente de permeabilidade, de 10^{-10} a 10^{-13} , e ao controle de qualidade do processo de fabricação.

As geomembranas têm como matéria prima os polímeros, cujas propriedades moleculares ditam o comportamento e as resistências mecânica, química e física do geossintético. Para a fabricação de geomembranas são comumente empregados polímeros com baixo coeficiente de permeabilidade, como PE de baixa e alta densidade, PP ou PVC.

Para o presente estudo é de especial interesse o comportamento e a resistência da geomembrana quando solicitada à tração. Este valor de resistência pode ser obtido por ensaios de tiras estreitas e de faixa larga. Conforme exposto por Koerner (2012), o ensaio de tiras estreitas é adotado somente para controle de qualidade, visto que impõe condições de resistência unidimensionais. Já o ensaio em faixa larga apresenta condições de carregamento similares às que ocorrem em campo, e por isso seus resultados são os adotados para dimensionamento.

Tão importante quanto os valores de resistência, é o entendimento de como os esforços atuantes solicitam a geomembrana. Neste sentido, Giroud, Pelte, Bathurst (1995) analisaram como a ação do vento gera forças de sucção que tendem a movimentar a geomembrana para fora do plano em que está assentada, resultando em esforços de tração. Por meio da análise realizada os autores estabeleceram a relação carga-deformação para a geomembrana sob condições de suspensão, representada na equação a seguir.

$$\varepsilon = \frac{2T}{S_e L} \sin^{-1} \left[\frac{S_e L}{2T} \right] - 1 \quad (1)$$

Em que ε é a deformação da geomembrana (adimensional); T é a tração na geomembrana (kN); S_e é a sucção uniformemente distribuída (kN/m); L é o comprimento (m).

3 Galgamento

O galgamento é um dos possíveis modo de falha de uma barragem, e ocorre quando o nível de água supera o nível da crista. Quando o fluxo que corre sobre a crista da barragem é capaz de erodi-la, pode ocorrer formação da brecha de ruptura e liberação do material contido para a área a jusante.

A erosão do maciço depende das características e condições do material do aterro e de fatores não facilmente mensuráveis, visto que ocorre sob transições de regime e turbulências de escoamento que interagem com a geomorfologia do próprio processo erosivo. Por conta dessa complexidade, esse processo foi alvo de estudos experimentais em modelo de larga escala de uma barragem de terra para simular o processo de galgamento (Froehlich, 2004 - Figura 1), monitorando o desenvolvimento da brecha.

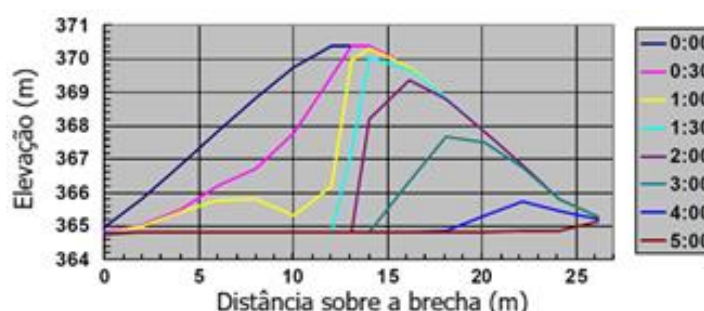


Figura 1. Seção transversal da barragem experimental. Fonte: Froehlich (2004).



4 Metodologia Proposta

Os registros feitos por Froehlich (2004) acerca da erosão de uma barragem de terra sob galgamento são bastante conclusivos quanto à morfologia da brecha formada no dique: a erosão ocorre de jusante a montante com a formação de degraus e escarpas até que se atinja o talude de montante. Dessa forma, a presença da geomembrana somente no talude de montante não interfere no processo de galgamento até o momento em que a erosão a alcança. A Figura 2 apresenta a configuração esperada para o início do galgamento com geomembrana no talude de montante.

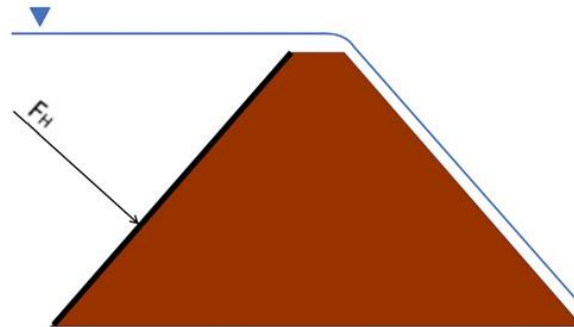


Figura 2. Configuração do início do processo de galgamento.

A força hidrostática exercida pela coluna d'água sobre o talude de montante é resistida pelo maciço e pela interação entre o maciço e a geomembrana. O dimensionamento da estrutura deve contemplar o atrito entre os materiais para que a pressão hidrostática não cause o escorregamento da geomembrana. Será considerado que o dimensionamento foi corretamente executado e que a geomembrana não sofre escorregamento desde que esteja em contato com o dique.

Conforme o processo de erosão do dique se inicia e avança rumo ao talude de montante, as condições iniciais são mantidas. Porém, ao alcançar o talude de montante, espera-se uma alteração no processo de erosão observado por Froehlich (2004). A presença da geomembrana, se assumido que sua ancoragem a segura na cota da crista, mantém o limite físico inferior para o escoamento também na cota da crista. Após passar pelo limite da geomembrana, o escoamento passa pelo regime de queda livre e atinge o pé das escarpas, causando erosão localizada como representado na Figura 3 (A).

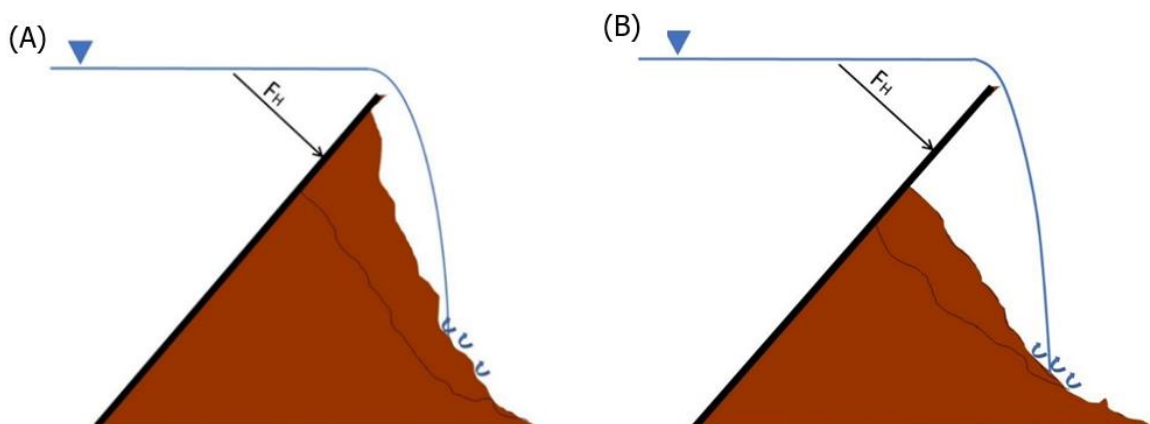


Figura 3. (A) Processo erosivo no talude de montante com geomembrana; (B) Geomembrana atuando como contenção no topo do reservatório.

É importante notar que neste estágio a crista do maciço está completamente erodida. Espera-se, portanto, que o processo de erosão no pé da escarpa associado à pressão hidrostática exercida na parte superior do maciço, que já perdeu grande parte de seu material, cause sucessivos escorregamentos no restante do maciço.

A perda do material na parte superior do maciço faz com que a geomembrana seja o único elemento de sustentação da força hidrostática no topo do reservatório, como representado na Figura 3 (B). Na parte inferior



do dique, onde ainda há material, a força hidrostática é suportada pela terra. Conforme escorregamentos sucessivos ocorrem no maciço, aumenta a parcela da pressão hidrostática suportada pela geomembrana.

Na Figura 4 está representada a atuação da força hidrostática sobre a geomembrana e todas as variáveis necessárias para sua determinação. Esta força varia linearmente com a profundidade se mantida a densidade do fluido. De modo a simplificar a análise será desconsiderado o nível d'água na cota da crista.

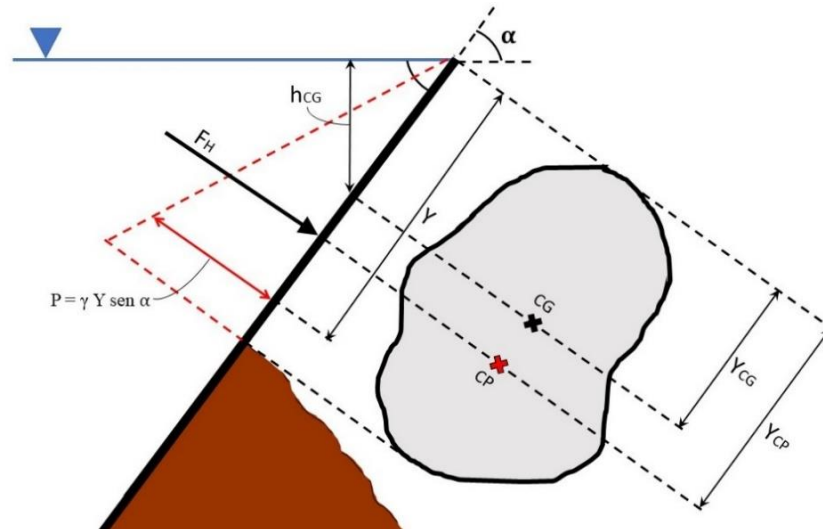


Figura 4. Força hidrostática sobre a geomembrana.

A força que atua sobre a superfície pode ser obtida pela multiplicação da pressão pela área. Porém, visto que a pressão é determinada em função da profundidade, a força deve ser determinada para um elemento infinitesimal da área.

$$dF_H = \gamma Y \sin \alpha dA \Rightarrow F_H = \gamma \sin \alpha \int Y dA = \gamma \sin \alpha Y_{CG} A = \gamma h_{CG} A \quad (2)$$

Em que F_H é a força hidrostática (N); A é a área da superfície submersa (m^2); h_{CG} é a profundidade do centro de gravidade da superfície submersa (m).

Observa-se, portanto, que a resultante da força hidrostática sobre a geomembrana é determinada pelo produto da pressão que atua em seu centro de gravidade pela área de atuação. Porém, a aplicação dessa resultante ocorre no ponto denominado centro de pressão. A força hidrostática está contida, então, num plano perpendicular à geomembrana e que passa pelo seu centro de pressão. Se para esse plano forem adotadas premissas análogas às adotadas por Giroud, Pelte e Bathurst (1995), os esforços atuantes na geomembrana podem ser representados conforme Figura 5. As premissas adotadas para o presente caso são:

- Um comprimento L da geomembrana, correspondente à largura da brecha, é considerado sujeito à força hidrostática e os movimentos da geomembrana são considerados restritos em ambas as extremidades do comprimento L devido ao atrito com o maciço;
- Nas regiões em que o dique não sofreu erosão, o atrito da geomembrana com o maciço resistirá aos esforços solicitantes;
- A geomembrana está livre para se mover para longe do plano de assentamento ao longo do comprimento L , visto que o maciço foi erodido nessa região;
- Não há qualquer mecanismo que diminua a pressão da coluna d'água sobre a geomembrana e as análises não são aplicáveis a geomembranas que são rasgadas;
- A magnitude da força hidrostática não se altera em resposta às mudanças na forma da geomembrana após a deformação inicial;
- A força hidrostática é uniforme ao longo de toda a largura da brecha e normal à geomembrana;
- O problema é considerado bidimensional e, portanto, o ensaio de tração de faixa larga fornece uma aproximação satisfatória da resistência da geomembrana para este caso;



- A seção transversal da geomembrana deformada no plano de atuação da força hidrostática tem forma circular.

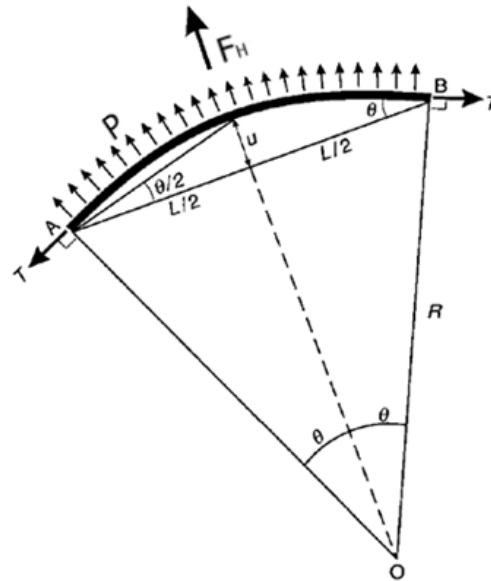


Figura 5. Diagrama de corpo livre da geomembrana no plano que passa pelo seu centro de pressão. Fonte: Giroud, Pelte e Bathurst (1995). [Adaptado]

Também de forma análoga à proposta por Giroud, Pelte e Bathurst (1995), para a situação apresentada na Figura 5, a relação carga-deformação para a geomembrana é descrita pela equação a seguir:

$$\varepsilon = \frac{2T}{F_H} \sin^{-1} \left[\frac{F_H}{2T} \right] - 1 \quad (3)$$

Em que T é o esforço de tração na geomembrana (kN); ε é a deformação da geomembrana (adimensional).

A tração pode ser determinada pelo equilíbrio das extremidades em função do ângulo da deformação, conforme a seguinte equação:

$$T = \frac{F_H}{2 \sin \theta} \quad (4)$$

Em que F_H é a força hidrostática (N); θ é o ângulo central do arco formado pela deformação da geomembrana no vão formado pela largura da brecha (°).

Para determinar se a geomembrana resiste à força hidrostática, sua curva tensão-deformação deve ser comparada à relação carga-deformação. Isso pode ser feito ao plotar no mesmo gráfico a curva da relação carga-deformação e a curva normalizada de carga-deformação da geomembrana, obtida a partir da transformação da curva tensão-deformação em carga-deformação e dividida pela força hidrostática. É importante ressaltar que não há solução analítica para a metodologia proposta, e a solução deve ser obtida numericamente.

5 Estudo de Caso

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta serão utilizados os dados da barragem construída para o experimento de Froehlich (2004) e será feita a suposição de que a barragem possui sistema de impermeabilização composto por geomembrana de PEAD com 1,5 milímetro de espessura no talude de montante. O PEAD foi escolhido por ser o material mais comumente adotado em sistemas de impermeabilização e por apresentar elevada resistência a pequenas deformações, com tensão de escoamento



bem definida. Será admitido, de maneira simplificada, que o fluido contido pela barragem é água e que a brecha se propaga com forma retangular. Serão avaliados quatro casos, com variação na relação entre largura e altura da brecha, para que se possa analisar se há o rompimento da geomembrana com diferentes parâmetros geométricos resultantes da erosão do maciço e como esses parâmetros se relacionam com os resultados. Na Tabela 1 são apresentados os dados da barragem, os cenários avaliados, os parâmetros do fluido e os parâmetros de resistência do PEAD obtidos por Koerner (2012) no ensaio de faixa larga.

Tabela 1. Dados de entrada para o estudo de caso

Parâmetro da barragem	Valor
Altura	6 m
Largura da crista	2 m
Comprimento da crista	36 m
Inclinação do talude de montante	2H:1V
Cenários	Relação largura/altura da brecha
Cenário 1	4
Cenário 2	2
Cenário 3	1
Cenário 4	0,5
Parâmetros do fluido	Valor
Densidade da água	1000 kg/m ³
Aceleração da gravidade (g)	9,81 m/s ²
Peso específico da água (γ)	9,81 kN/m ³
Parâmetros de resistência da geomembrana de PEAD (#1,5 mm)	Valor
Espessura do corpo de prova	1,5 mm
Largura do corpo de prova	200 mm
Tensão de escoamento	15900 kPa
Deformação no escoamento	15%
Resistência por metro de largura	23,85 kN/m

A metodologia proposta demanda solução numérica e, portanto, foi utilizada planilha de cálculo capaz de encontrar a coluna d'água para a qual os esforços solicitantes igualam os resistentes, caso isso ocorra.

6 Resultados

Na Tabela 2 estão apresentados os valores obtidos por meio de solução numérica para os cenários especificados.

Tabela 2. Resultados obtidos para os 4 cenários

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Lâmina d'água acima da geomembrana (h)	1,38 m	1,96 m	2,77 m	3,92 m
Largura da brecha (L)	5,54 m	3,92 m	2,77 m	1,96 m
Área da superfície da geomembrana (A)	17,15 m ²	17,18 m ²	17,16 m ²	17,15 m ²
Força hidrostática (F_H)	116,43 kN	165,17 kN	233,11 kN	330,33 kN
Tração solicitante	73,88 kN	104,80 kN	147,91 kN	209,60 kN
T/F solicitante	0,6345	0,6345	0,6345	0,6345
Tração total resistente	73,84 kN	104,53 kN	147,72 kN	209,05 kN
T/F resistente	0,6342	0,6329	0,6337	0,6329

Os resultados expostos na Tabela 2 mostram que para a geomembrana adotada, quando a força



resistente normalizada não alcança o valor de 0,6345 para deformação de 15%, ocorre o rompimento. Pode ser observado que a força solicitante normalizada é constante para uma dada deformação e os resultados devem ser interpretados em relação à variação da força resistente normalizada. Essa variação ocorre porque o limite de escoamento da geomembrana, apesar de constante, é dividido pela força hidrostática solicitante.

Na Figura 6 é possível visualizar como a força resistente normalizada se comporta com a variação da coluna d'água e consequentemente da força hidrostática solicitante. Para o cenário 1, valores de coluna d'água abaixo do valor limite 1,38 metros estão sobre a curva da força solicitante normalizada, o que significa que a solicitação na geomembrana é menor que o limite de escoamento para a deformação correspondente. Conforme a coluna d'água aumenta, a força resistente normalizada sofre decréscimo até que ultrapasse a curva, o que configura esforço solicitante acima do limite de escoamento e ruptura da geomembrana.

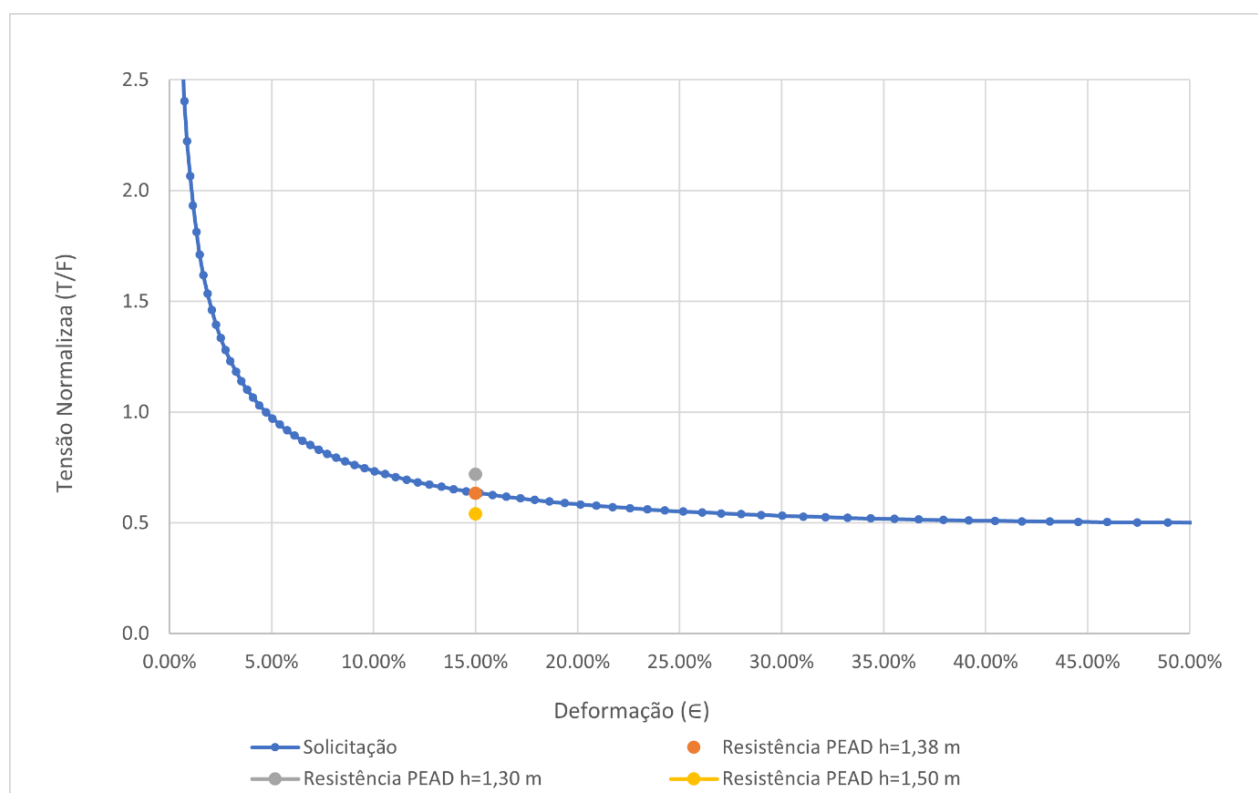


Figura 6. Variação da força resistente normalizada para o cenário 1.

O uso da curva de força normalizada para comparação com os esforços resistentes pressupõe, portanto, que seja fixado um valor de deformação para uma dada resistência. Para o caso da geomembrana de PEAD, essa comparação ocorre a baixas porcentagens de deformação por conta de seu comportamento tensão-deformação com proeminente tensão de escoamento. Para outros materiais, em que não há tensão de escoamento e a tensão resistente adotada é a tensão última, essa comparação se dará a elevadas deformações.

A avaliação sob elevadas deformações pode tornar a metodologia desnecessária, visto que uma geomembrana muito deformada pode não atuar como barreira para o fluxo em galgamento. Nesse cenário, a presença da geomembrana, mesmo se não rompida, poderia não ter impacto significativo no processo de ruptura da barragem.

Outro importante fator que pode ser observado nas tabelas é que a variação na proporção das dimensões da brecha impacta a profundidade da brecha e o valor dos esforços atuantes para os quais ocorre o rompimento da geomembrana, mas sob valor de área constante. Isso significa que para as premissas adotadas, a proporção de progressão da brecha não é relevante, pois desde que determinada área da geomembrana atue como elemento único de contenção, ocorrerá o rompimento. Para avaliar outras formas geométricas de progressão de brecha a metodologia deve ser adaptada.



7 Conclusão

O objetivo deste trabalho foi avaliar se a presença de geomembrana no talude de montante de uma barragem teria algum impacto caso a estrutura passe pelo processo de galgamento. Uma possível contribuição do material poderia representar ganhos em aspectos de segurança da barragem, algo muito demandado principalmente nas barragens de rejeitos de mineração no Brasil.

A partir da revisão da literatura, pôde-se notar que há grande quantidade de trabalhos publicados sobre geossintéticos e sobre rupturas de barragens por galgamento, porém não foram encontrados trabalhos que relacionassem a geomembrana no talude de montante com o processo de galgamento. Dessa forma, foi necessário avaliar situações análogas ao tema de estudo a fim de se obter bases para o desenvolvimento da metodologia de avaliação proposta. Além disso, também foi necessário a adoção de premissas compatíveis às adotadas nas metodologias de referência.

As premissas adotadas dizem respeito principalmente às forças na interface entre a geomembrana e o maciço e ao processo de erosão do talude de montante sob a geomembrana. Tais premissas poderiam ser confirmadas ou refutadas por meio da construção de um modelo experimental reduzido para simulação e observação do processo.

As dimensões adotadas para aplicação da metodologia são bastante reduzidas em comparação às estruturas de contenção de rejeito: o modelo de Froehlich (2004) possuía 6 metros na dimensão vertical enquanto barragens de rejeito têm dezenas de metros de altura. Pode-se imaginar então, que para barragens com maiores dimensões a geomembrana estaria suscetível à atuação de esforços mais elevados que também a levariam à ruptura.

É possível concluir, portanto, que a geomembrana presente no talude de montante de uma barragem não tem impacto significativo sobre o processo de galgamento, pois é rompida sob carga hidrostática relativamente baixa em comparação à carga disponível em barragens de rejeito. Esse geossintético apresenta bom desempenho quando aplicado como material de impermeabilização, mas não possui resistência suficiente para atuar sozinho como material de contenção. Assim, não deve ser considerada qualquer contribuição do material para um evento de galgamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à SEFAC-CA-072/2017 / CA-071/2017, CAPES, CNPq, FAPEMIG, CEMIG, FURNAS e ELETROBRÁS pelo apoio e suporte financeiro para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Geroto, R. E. (2008) *Desempenho de camadas de proteção para geomembranas*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 188 p.
- Soto, J. R. A. (2015) *Estudo da variação de propriedades de geomembranas de PVC devido a danos mecânicos*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 147 p.
- Koerner, R. M. (2012) *Designing with geosynthetics*, v. 2. 6 ed. New Jersey: Prentice-Hall, 418 p.
- Giroud, J. P.; Pelte, T.; Bathurst, R. J. *Uplift of geomembranes by wind*. Geosynthetics International, v. 2, n. 6, p. 897-952, 1995.
- FROEHLICH, D. C. (2004) *Two-dimensional model for embankment dam breach formation and flood wave generation*. Association of State Dam Safety Officials Conference, Lexington, Kentucky. 2004.