

Estudo Numérico da Aplicação de Geomembrana como Tapete Impermeável a Montante em Barragens de Terra

Fernando Feitosa Monteiro
UFC, Fortaleza, Brasil, engffmonteiro@gmail.com

Samuel Carvalho Brandão
UFC, Fortaleza, Brasil, meuamigosamuel@yahoo.com.br

Jochezan da Silva Costa
UFC, Fortaleza, Brasil, jochezan@hotmail.com

Adriano Frutuoso da Silva
UFC, Fortaleza, Brasil, adrianofrutuoso@deha.ufc.br

RESUMO: O tapete impermeável a montante de barragens é uma alternativa de controle de percolação com a qual amplia-se o comprimento de percolação, dessa forma, atenuando a vazão, as forças de percolação e consequentemente os gradientes de saída. As geomembranas são consideradas geossintéticos de baixa permeabilidade, sendo constituídas por mantas poliméricas flexíveis e de pequena espessura. As geomembranas são frequentemente empregadas como revestimento de reservatórios (de água e de rejeitos da mineração), além de serem aplicadas como bases de aterros sanitários. Nesta conjuntura, este trabalho exhibe uma avaliação do desempenho do tratamento de fundações de barragens de terra com a utilização de geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade), objetivando a compreensão dos fenômenos envolvidos e o desenvolvimento de sua utilização. A análise da alternativa envolve o uso de técnicas numéricas, a partir da aplicação do método dos elementos finitos. As simulações realizadas no presente trabalho mostraram que quanto maior a extensão do tapete de impermeabilização a montante maior foi a redução da vazão de percolação pela fundação da barragem. Para a seção estudada, um aumento de 20 m de extensão no tapete de argila correspondeu a uma redução de aproximadamente 5% da vazão de percolação, enquanto que para o tapete de geomembrana de PEAD obteve-se 14%. O gradiente hidráulico não apresentou alteração significativa neste estudo. Ressalta-se, por fim, que os resultados obtidos pelo uso de geomembrana de PEAD exigem a observação de requisitos como ancoragem, soldagem, transpasse e aspereza da manta. Não menos importante, deve-se observar que os procedimentos de execução do tapete de geomembrana podem elastecer o prazo de execução da obra quando comparado ao tapete de argila compacta.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de Terra, Tapete Impermeável, Geossintéticos, Modelagem Numérica

1 INTRODUÇÃO

Cardoso *et al.* (2010) relatam a primeira vez em que foi empregada uma manta de PEAD (polietileno de alta densidade) como solução de tapetes impermeáveis de barragens no Brasil, ou

seja, a sua aplicação na impermeabilização parcial da ombreira direita da Usina Hidrelétrica São Salvador. A UHE fica no município de São Salvador - TO, no Rio Tocantins, coordenadas SIR2000 (-12.808323, -48.238130), tendo sido

inaugurada em 2009 e tem capacidade instalada de 243 MW.

Considerações sobre falhas em reservatórios impermeabilizados com geomembranas podem ser encontradas em Wu *et al.* (2008) e Giroud e Bonaparte (1989). Estes autores apresentaram uma descrição da utilização de geomembrana em barreiras impermeabilizantes, salientando as consequências de possíveis vazamentos. Tratamentos inadequados podem resultar em fundações excessivamente permeáveis, levando a gradientes de saída elevados no talude de jusante e, eventualmente, iniciar processos de erosão regressiva (*piping*). Os tipos de tratamento impermeabilizante mais utilizados em barragens são a trincheira de vedação (*cut-off*), a cortina de injeções de calda de cimento, a cortina de estacas prancha, os diafragmas executados *in-situ* (plástico e rígido) e os tapetes impermeabilizantes a montante. Uma maneira de comparar o desempenho de alternativas de tratamento de impermeabilização da fundação é através de modelagem bidimensional de fluxo, utilizando o método dos elementos finitos, onde se extraem valores de vazão de percolação pela fundação da barragem, assim como gradientes de saída.

2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 Controle de percolação pela fundação de uma barragem

Segundo o Bureau of Reclamation (1965), o projeto e a construção de barragens de terra devem levar em consideração critérios para a garantia da segurança da obra como: o dimensionamento do vertedouro, proteção dos taludes contra erosão, não transferir tensões excessivas às fundações e possuir um controle de percolação através do maciço e das fundações eficientes.

Existe a necessidade de compreender que a percolação em barragens depende de determinados fatores e que o dimensionamento de estruturas de controle de percolação estão diretamente vinculados ao coeficiente de permeabilidade da fundação, área transversal do fluxo, carga hidráulica disponível no

reservatório e o comprimento de percolação ao longo da barragem (BOWLES, 1984).

2.2 Tapete impermeabilizante a montante

Um tapete horizontal permeável a montante ocasiona um aumento do comprimento de percolação através da fundação, sua aplicação é indicada quando se tem uma camada permeável de grande espessura, podendo possuir maior eficiência do que um “cut-off” parcial em caso de uma fundação homogênea. A utilização de tapete impermeabilizante a montante é uma boa solução para regiões de sismos, dessa maneira evitando a utilização de materiais de rigidez diferente na fundação (SILVA FILHO, 1991). O dimensionamento do tapete consiste em se determinar o comprimento necessário para obter-se uma vazão admissível pela fundação e segurança quanto ao carreamento de “piping”. Uma camada natural de baixa permeabilidade na superfície do terreno pode funcionar como um tapete impermeabilizante (Figura 1), sendo usualmente constituídos por solo argiloso compactado, contando eventualmente com uma proteção mecânica com camada de enrocamento.

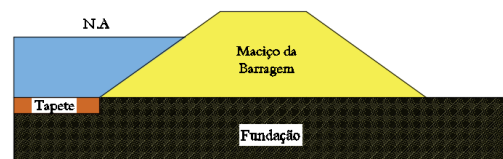


Figura 1. Seção típica com tapete a montante

2.3 Utilização de geomembrana como tapete impermeável a montante

Segundo Pierozan *et al.* (2014), o emprego de geomembranas de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) como revestimento de reservatórios (de água e de rejeitos da mineração), vem sendo prática comum nas obras de engenharia geotécnica onde se observa a necessidade da melhoria de alguma característica do solo local, em virtude das vantagens de caráter técnico e econômico que os materiais sintéticos oferecem em relação aos materiais convencionais.

De acordo com Cardoso *et al.* (2010), a utilização de uma membrana de PEAD visa a reduzir a espessura de solo compactado aplicada e a evitar o risco de baixa eficiência do tapete impermeável, decorrente do surgimento de trincas durante a fase construtiva. Devido também ao risco de ruptura da manta por efeito de punção, é prática uma camada de solo compactado para servir de substrato para a membrana. Além disso, para amenizar os efeitos de uma eventual ruptura localizada da geomembrana por efeito mecânico, pode-se apor sobre ela uma camada de solo compactado. Na UHE São Salvador a espessura da camada de solo executada foi de 2 metros. E sobre a referida camada de solo também foi executada uma camada de enrocamento contaminado, aproveitando materiais excedentes de escavação em rocha. O sistema convencional de ancoragem de mantas de PEAD é por trincheiras escavadas no terreno. O bom funcionamento da solução está intimamente condicionado à ligação entre o tapete impermeabilizante e a vedação do aterro da barragem. No entanto, Cardoso *et al.* (2010) relatam que na UHE São Salvador a instalação da manta no aterro da barragem instituindo o transpasse com a vedação da barragem e a ancoragem da membrana, constituiria um contratempo importante à execução das camadas do aterro, atrasando a produção do aterro da barragem. Esta situação também está condicionada ao processo de execução e teste das emendas que têm de ser realizados diretamente na posição final de lançamento da manta. Porquanto, na UHE optou-se por um sistema de ancoragem no talude de montante da barragem que pudesse ser realizado independentemente da compactação do solo no barramento, sendo que, como critério para a ancoragem da manta na barragem definiu-se garantir ao menos uma espessura de aterro equivalente a $0,20H$ (sendo H a altura da carga hidráulica sobre a manta), entre a ancoragem da membrana e a superfície de fundação, como pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Ancoragem da geomembrana com aterro compactado (Fonte: Cardoso *et al.* (2010))

Outra característica considerada importante para garantir a aderência entre o solo e a membrana, é o uso de manta de PEAD texturizada em matriz tipo balão, que apesar do menor controle de espessura da manta, resulta num produto mais irregular. Esta irregularidade é conveniente para evitar o risco da instalação de um caminho preferencial de percolação, como no caso de aplicação de manta lisa.

Cardoso *et al.* (2010) também relatam que na UHE São Salvador, como complemento ao tratamento de impermeabilização aplicado, além da trincheira drenante contínua que percorre o pé de jusante da barragem, no trecho impermeabilizado, foi instalada uma linha de poços de alívio, com o intuito de captar a eventual percolação advinda de estratos mais profundos da fundação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho apresenta uma simulação numérica para a avaliação do desempenho do tratamento de fundações de barragens de terra com o emprego de geomembranas de PEAD, objetivando o entendimento dos fenômenos envolvidos e o aperfeiçoamento de sua utilização. Na Figura 3 ilustra-se a seção de estudo da barragem modelada, onde a barragem possui uma altura de 35 m, cota do leito do rio a 26 m de altura a montante e 9,6m a jusante. Os taludes de montante e jusante possuem inclinação de 1:3 (V:H).

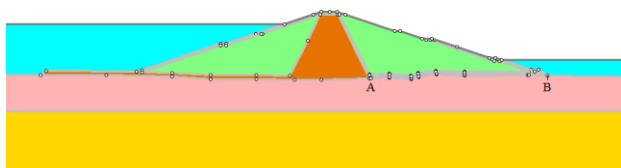


Figura 3. Seção de estudo da barragem

Na Tabela 1, têm-se a descrição dos parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais utilizados na modelagem. A barragem estudada possui um núcleo de argila compactada, com espaldares de solo argiloso e tapete impermeabilizante de material similar ao executado no núcleo. A fundação da barragem é composta por uma camada de arenito superficial com espessura de 19 m e assente sobre uma camada de 30 m de arenito profundo. Na seção, foram indicados dois pontos representados pelas letras A e B. O ponto A localiza-se no encontro do arenito superficial com o filtro, logo após o núcleo da barragem. Já o ponto B está localizado na interface entre o arenito superficial e o final do sistema de filtro horizontal.

Tabela 1. Parâmetros de resistência e permeabilidade dos materiais usados nos modelos

Convenção	Material	γ (kN/m ³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	k (m/s)
	Arenito superficial	21	33	50	5×10^{-5}
	Arenito profundo	21	33	50	1×10^{-6}
	Solo argiloso compactado (Tapete impermeabilizante e núcleo da barragem)	20	25	5	1×10^{-8}
	Solo argiloso compactado (Espaldares da barragem)	19	25	10	1×10^{-7}
	Filtro de areia compactada (Material F)	19	34	0	1×10^{-4}
	Pedrisco (Material T1)	19	36	0	5×10^{-4}
	Brita (Material T2)	19	36	0	3×10^{-2}

Dessa forma, foram realizadas simulações com tapete a montante composto por geomembrana de PEAD e do solo que compõe o núcleo da barragem, com o objetivo de verificar a eficiência de ambas as soluções. Foram realizadas simulações variando-se o comprimento do tapete (50, 70, 90 e 100 m) a

fim de verificar os efeitos de tal variação. A geomembrana utilizada como tapete impermeável a montante tem um coeficiente de permeabilidade de $1,4 \times 10^{-13}$ m/s e as demais características descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Características técnicas da manta PEAD

Características	Valores mínimos
Espessura	1,5 mm
Massa específica	0,94 g/cm ³
Resistencia à tração no escoamento	15 MPa
Tensão de escoamento	15 MPa
Deformação no escoamento	12%
Resistencia ao rasgamento	190 N
Resistencia ao puncionamento	490 N

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com as informações apresentadas anteriormente foram modeladas duas seções: uma com tapete a montante composto pelo mesmo solo utilizado no núcleo da barragem e outra com tapete a montante composta por uma geomembrana. Foram estudadas as condições de percolação das duas seções com extensões do tapete impermeabilizante de 50m, 70m, 90m e 100m à montante do pé da barragem.

Na Tabela 3, estão apresentadas as vazões de percolação estudadas para o tapete impermeabilizante a montante composto por solo.

Tabela 3. Vazão de percolação da seção com tapete de argila compacta

Extensão do Tapete Impermeabilizante composto por solo (m)	Vazão (m ³ /s / m)
50	$4,1709 \times 10^{-7}$
70	$3,9933 \times 10^{-7}$
90	$3,8162 \times 10^{-7}$
100	$3,7267 \times 10^{-7}$

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que quanto maior a extensão do tapete impermeabilizante, menor será a vazão de percolação pela fundação da barragem, ainda verifica-se que para a seção estudada, um aumento de 20 m de extensão no tapete

corresponde a uma redução de aproximadamente 5% da vazão de percolação. Na Figura 4 pode-se observar a vazão para o tapete de 50m e a distribuição a carga total ao longo da barragem.

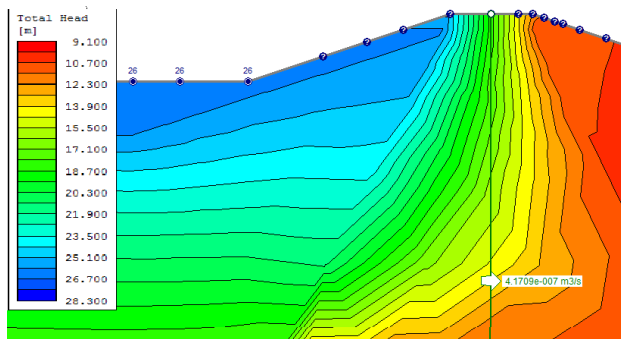


Figura 4. Vazão de percolação pela barragem-fundação

O gradiente hidráulico não apresentou alteração significativa no ponto A. Já no ponto B, passou de um gradiente de 0,05, para a seção com tapete de 50m, para um gradiente de 0,01, para a seção com tapete de 90m.

Os valores das vazões de percolação estudadas para o tapete impermeabilizante a montante composto por geomembrana são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Vazão de percolação da seção com tapete de geomembrana

Extensão do Tapete Impermeabilizante composto por geomembrana de PEAD (m)	Vazão (m³/s / m)
50	3,7171 x 10 ⁻⁷
70	3,2435 x 10 ⁻⁷
90	2,7566 x 10 ⁻⁷
100	2,5045 x 10 ⁻⁷

Avaliando os resultados obtidos, nota-se que a vazão pelo conjunto barragem-fundação diminui a medida que a extensão do tapete aumenta. Na mudança da extensão de 50m para 70m verificou-se uma redução de 12,74% da vazão, a diferença da vazão entre 70m e 90m se da na ordem de 15,03%. O tapete com extensão de 90m e o de 100m apresentaram desigualdade de 9,13%, assim, é possível observar que a variação de vazão para uma diferença de extensão de 20m se encontra em torno 14%.

Comparando os valores das Tabelas 3 e 4, nota-se que o tapete a montante composto por

geomembrana apresenta os menores valores de vazão, cuja justificativa se da pela a condutividade hidráulica do material ser bastante inferior ao do solo argiloso compactado, assim, aumentado o caminho de percolação através do solo e reduzindo a vazão.

Para a extensão de 50 m, o tapete de geomembrana de PEAD apresentou uma vazão de 10,88% menor que o tapete constituído por solo. Já para as extensões de 70 m, 90 m e 100 m o tapete de geossintético apresentou uma vazão 18,78%, 27,78%, e 32,8% menor, respectivamente, que a vazão do tapete composto por argila compactada, conforme se observa na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação da vazão de percolação dos tipos de tapetes estudados

Tipo de Tapete	Vazão (10 ⁻⁷ m³/s/m) para a extensão do tapete (m)			
	50	70	90	100
Argila compactada	4,1709	3,9933	3,8162	3,7267
Geomembrana de PEAD	3,7171	3,2435	2,756	2,5045
Diferença (%)	10,88	18,78	27,78	32,80

Os resultados obtidos pelo uso de geomembrana de PEAD exigem a observação de requisitos como ancoragem, soldagem, transpasse e aspereza da manta. Não menos importante, deve-se observar que os procedimentos de execução do tapete de geomembrana podem elastecer o prazo de execução da obra quando comparado ao tapete de argila compacta.

5 CONCLUSÃO

As simulações realizadas no presente trabalho mostraram que quanto maior a extensão do tapete de impermeabilização a montante maior foi a redução da vazão de percolação pela fundação da barragem. Para a seção estudada, um aumento de 20 m de extensão no tapete de argila correspondeu a uma redução de

aproximadamente 5% da vazão de percolação, enquanto que para o tapete de geomembrana de PEAD obteve-se 14%. O gradiente hidráulico não apresentou alteração significativa neste estudo.

Seja o tapete de argila compactada, seja de geomembrana de PEAD, as maiores variações de carga ocorrem na fundação, sob o tapete e sob o espaldar de montante da barragem. Entretanto, sob o espaldar de jusante é pequena a variação nas cargas de pressão. Ao comparar as vazões de percolação entre os tapetes de argila compactada e os tapetes de geomembrana com extensões de 50m, 70m, 90m e 100m, verificou-se que as vazões obtidas com a aplicação do geossintético foram, respectivamente, 10,88%; 18,78%, 27,78%; 32,8% menores que as obtidas com a execução de tapete de argila impermeável. Tal conclusão já era esperada pelo fato da condutividade hidráulica da geomembrana de PEAD possuir uma ordem de grandeza relativamente menor ao do solo argiloso compactado, assim, aumentando o caminho de percolação através do solo e reduzindo a vazão.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece pela bolsa concedida pela CAPES.

REFERÊNCIAS

- Bowles, J. E. (1984). “*Physical and Geotechnical Properties of Soils*” – International Student Edition.
- Bureau of Reclamation.(1965). *Design of small dams – United States Department of the Interior*
- Cardoso, R. M.; Calcina, A. M.; Oliveira, C. A. de; Carvalho, A. H. E.; Sarlo, R. J. F.(2010) *Utilização de Geomembrana de PEAD em Tratamento de Fundação na Barragem de São Salvador, Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado.*
- Giroud, J. P. e Bonaparte, R. (1989) *Leakage through liners constructed with geomembranes – part I Geomembrane liners. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 8, p. 27-67.*
- Pierozan, R.C.; Miquelletto, M.; Teixeira, S.H.C. (2014) *Utilização de Tapete de Controle de Fluxo a Montante de Barragens de Terra e Enrocamento Através de Geomembrana, Congresso Brasileiro de*

Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Goiânia

Silva Filho, F. C. (1991) *Tapetes impermeabilizantes a montante de barragens sobre aluviões permeáveis. . Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ.*

Wu, W.; Wang, X.T.; Aschauer, F. (2008) Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 26, p. 363–370.