

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE BARRAGENS COM NÚCLEO DE CONCRETO ASFÁLTICO

Alexandre de Souza Júnior¹
Henrique Antônio Oliveira Araújo²

RESUMO

As barragens apresentam-se como alternativa viável de convivência com os longos períodos de estiagem das regiões semiáridas ou desérticas. Apesar disso, a escassez de solos e a disponibilidade de jazidas para obter materiais que atendam às necessidades de projeto para a construção de barragens levaram a necessidade de adotar procedimentos alternativos, culminando na aplicação dos núcleos asfálticos em barragens. Nesse contexto, foi analisada a estabilidade de barragens com núcleo asfáltico quanto às condições hidráulicas. Para isso, a metodologia consistiu na modelagem numérica através das ferramentas SEEP/W e SLOPE/W de uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, para efeito de comparação do desempenho, e com núcleo asfáltico. Verificou-se que, os materiais empregados no núcleo das barragens, apresentaram comportamento satisfatórios nas análises de percolação e estabilidade de taludes.

Palavras-chave: Barragem, Núcleo de Concreto Asfáltico, Materiais Betuminosos.

INTRODUÇÃO

Segundo Cirilo (2008), a problemática dos recursos hídricos em regiões áridas e seminárias é o ponto central para superar os obstáculos ao progresso dessas regiões. De fato, os governantes atuam para implementar infraestruturas capazes de garantir água suficiente para o abastecimento humano e animal, além de viabilizar a irrigação. Apesar disso, esse esforço, de forma global, é insuficiente para resolução dos problemas recorrentes da escassez hídrica. Isso faz com que essas regiões continuem vulneráveis aos períodos de estiagem, especialmente quando se trata do uso difuso da água no meio rural.

Barragem é qualquer obstáculo construído em um curso d'água e que resulta no acúmulo e elevação do seu nível à montante da construção desse obstáculo (QUEIROZ DE CARVALHO, 1999).

Assim, constrói-se uma barragem para o represamento de água que irá servir para o abastecimento humano e industrial ou mesmo para irrigação ou para a piscicultura. Pode-se também decidir pela construção de uma barragem quando há a necessidade de controlar o

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, alexandrejr5@hotmail.com;

² Mestrando do Curso de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG,

(83) 3322.3222 henrique.zamora@gmail.com;

regime fluvial cheias de um rio e seus afluentes. Adiciona-se a estes objetivos a construção de barragens para a geração de energia elétrica recreação e a navegação (QUEIROZ DE CARVALHO, 1999).

Existem vários tipos de barragem que se diferenciam quanto ao formato, processo construtivo, características do material utilizado, além das estruturas funcionais imprescindíveis à estabilidade da estrutura. A escolha do método executivo leva em consideração a rapidez na execução e a economia.

Historicamente, os materiais betuminosos são utilizados para construção e impermeabilizações, sendo as misturas asfálticas utilizadas como elemento impermeabilizantes de barragens, principalmente na face de montante ou como núcleo da barragem (GUIMARÃES, 2012).

O asfalto, além de ser um material viscoelástico-plástico, impermeável e com trabalhabilidade, apresenta também capacidade de autocicatrização, aceitando melhor a ocorrência de recalques diferenciais. Somado a isso, possui características de flexibilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis. Essas características possibilitam seu uso como produto de mistura asfáltica para o núcleo de barragens (MICHELUZZI, 2016).

A adoção de núcleo de concreto asfáltico constitui alternativa interessante para execução de obras hidráulicas, por exemplo barragens e hidrelétricas, pois possibilita a adoção de elementos estruturais esbeltos, taludes íngremes, economia de materiais, além de execução simplificada, prazo reduzido e redução dos custos quando sob ação de condições climáticas diversas.

Além de ser impermeável e flexível, o núcleo de asfalto oferece resistência à erosão e ao envelhecimento, possibilitando com isso a utilização de rocha de baixa qualidade e fundações com sobrecarga compressiva profunda para projetos de barragens (WANG *et al.*, 2018).

De maneira geral, o concreto asfáltico é usado como barreira de água em barragens conferindo resistência à estanqueidade e, portanto, a permeabilidade é a propriedade mais relevante a ser estabelecida para o concreto asfáltico, a qual, por sua vez, é função direta dos parâmetros volumétricos das misturas compactadas (MICHELUZZI, 2016; WANG *et al.*, 2018).

Para a análise do escoamento da água no solo e suas implicações em barragens, é necessário saber a vazão percolada através do maciço e da fundação e as pressões neutras desenvolvidas (OLIVEIRA, 2014).

PERCOLAÇÃO

Segundo Oliveira (2014),

O solo é um material onde suas partículas sólidas se encontram de forma aleatória, posicionadas umas sobre as outras com vazios entre elas. Será por esses vazios que a água irá fluir. A maior ou menor facilidade com que a água percola pelo solo é quantificada pelo coeficiente de permeabilidade. Por exemplo, solos de partículas mais grossas têm os vazios maiores, permitindo que o fluxo de água ocorra mais facilmente, para esses casos o coeficiente de permeabilidade será maior quando comparado com solos de granulometria menor.

A proposta de Bernoulli, que representa a energia total em um ponto do fluido e define carga como energia por unidade de peso, é a base para análise para as análises de percolação. A Equação 1 apresenta a proposta de Bernoulli.

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z \text{ (Eq. 2)}$$

Onde:

- h = carga total;
- u = pressão de água;
- γ_w = peso específico da água;
- z = carga de elevação.

ESTABILIDADE DE TALUDES

De acordo com Georio (2000):

Os métodos de análise de estabilidade de taludes são divididos em duas categorias: métodos determinísticos, nos quais a medida da segurança do talude é feita em termos de um fator de segurança e métodos probabilísticos, nos quais a medida de segurança é feita em termos da probabilidade ou do risco de ocorrência da ruptura.

Segundo Dutra (2013):

Nos métodos de equilíbrio limite, os resultados da análise são geralmente apresentados em termos de um fator de segurança que indica a razão entre a resistência disponível e a resistência mobilizada. Têm-se então que o fator de segurança (FS) é a razão entre as forças estabilizantes e forças instabilizantes.

Neste tipo de análise, adotam-se as seguintes hipóteses:

- A superfície potencial de ruptura é previamente conhecida e ocorre ao longo de uma superfície bem definida;
- A massa de solo comporta-se como material rígido-plástico e encontra-se em condições iminentes de ruptura generalizada, ou seja, rompe-se bruscamente sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura do talude, ou seja, no estado onde a resistência da massa de solo é igual solicitação imposta a ele;

- O fator de segurança, FS, é constante ao longo da superfície potencial de ruptura, ignorando-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Dentre os métodos que utilizam a hipótese do equilíbrio limite, o mais utilizado é o Método das Fatias.

Esse método consiste na divisão da massa potencialmente instável em fatias verticais, sendo que a superfície potencial de ruptura pode ser circular ou poligonal. Para tal, analisam-se equações de forças (ou momentos) para cada fatia ou para a massa toda. Exemplos de métodos com superfície circular: Fellenius (1936), Taylor (1949) e Bishop (1955). Exemplos com superfície qualquer: Janbu (1973), Morgenstern e Price (1965) e Spencer (1967).

A solução para o problema é estaticamente indeterminada, pois há mais incógnitas do que equações de equilíbrio. Por isso, existem diversas abordagens baseadas em diferentes hipóteses simplificadoras. O método de solução consiste nas seguintes etapas:

- Subdividir o talude em fatias e assumir a base da fatia linear;
- Efetuar o equilíbrio de forças de cada fatia, assumindo que as tensões normais na base da fatia são geradas pelo peso de solo contido na fatia;
- Calcular o equilíbrio do conjunto através da equação de equilíbrio de momentos.

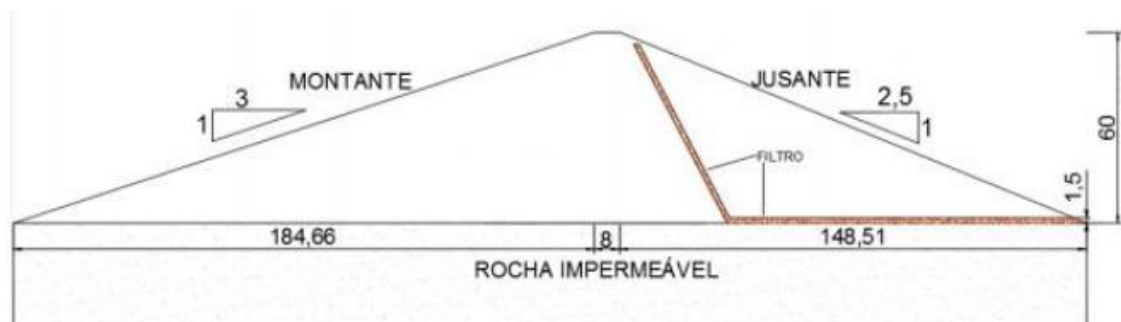
Para a elaboração desse estudo, optou-se pela utilização do método de Morgenstern & Price.

Nesse sentido, o estudo se propõe a avaliar o desempenho relacionado a estabilidade e ao comportamento hidráulico do concreto asfáltico utilizado em núcleos de barragens.

METODOLOGIA

Metodologicamente, o estudo avaliou o fluxo e a estabilidade do maciço de uma barragem de enrocamento de núcleo argiloso e núcleo asfáltico através de simulações computacionais utilizando Método dos Elementos Finitos. Para modelagem numérica, foi utilizado a seção transversal do maciço do Açude Epitácio Pessoa, modelo desenvolvido por Lima (2019) conforme a Figura 1.

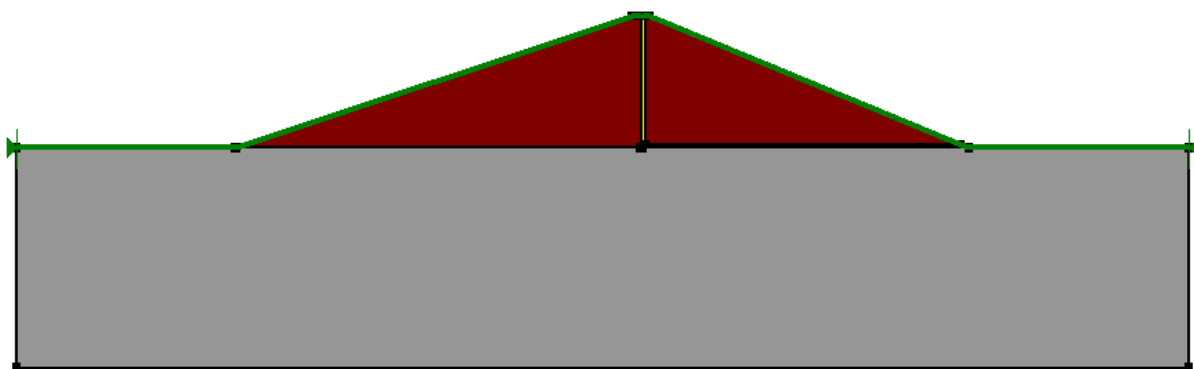
Figura 1 - Seção transversal do maciço



Fonte: Lima (2019)

Para satisfazer o objeto de estudo, foi necessária uma adaptação do modelo apresentado. Assim, mantendo as proporções, foram obtidos dois modelos: uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso e uma barragem de enrocamento com núcleo asfáltico.

Figura 2 - Definição da superfície de entrada



Para o caso da argila, o núcleo dispunha de uma espessura de base de 20,00 m, enquanto que, para a mistura asfáltica, esse valor variava entre 0,50 m; 1,00 m e 1,50 m. A variação desses valores, deve-se a literatura, pois referem-se as dimensões de núcleo asfáltico executáveis na prática. Em todas as situações, foi considerada a carga hidráulica constante e de valor 54 m.

Os dados geotécnicos dos materiais foram obtidos do estudo de Falcão (2007) e encontram-se dispostos na Tabela 1:

Tabela 1 - Propriedades geotécnicas dos materiais

Material	Peso específico (KN/m ³)	Coesão	Ângulo de atrito (°)	Permeabilidade e (m/s)
Enrocamento	18	10	45	1
Solo para núcleo	21,4	13	35	3,0x10 ⁻⁹
CBUQ Micaxisto (5,5% ligante)	24	397	28	2,3x10 ⁻¹¹
Filtro	14,80	0	35	10 ⁻⁴

Para a análise de fluxo e estabilidade de taludes, utilizou-se a versão 2018 do software GeoStudio. A análise de fluxo para obtenção das poropressões e a análise da estabilidade foi realizada, respectivamente, as ferramentas computacionais SEEP/W e SLOPE/W, ambos módulos integrados do software GeoStudio. As Figuras 3, 4 e 5 representam respectivamente a interface de entrada do software, a definição da geometria e os materiais utilizados.

Figura 3 - Interface de entrada do software



Figura 4 - Definição da geometria

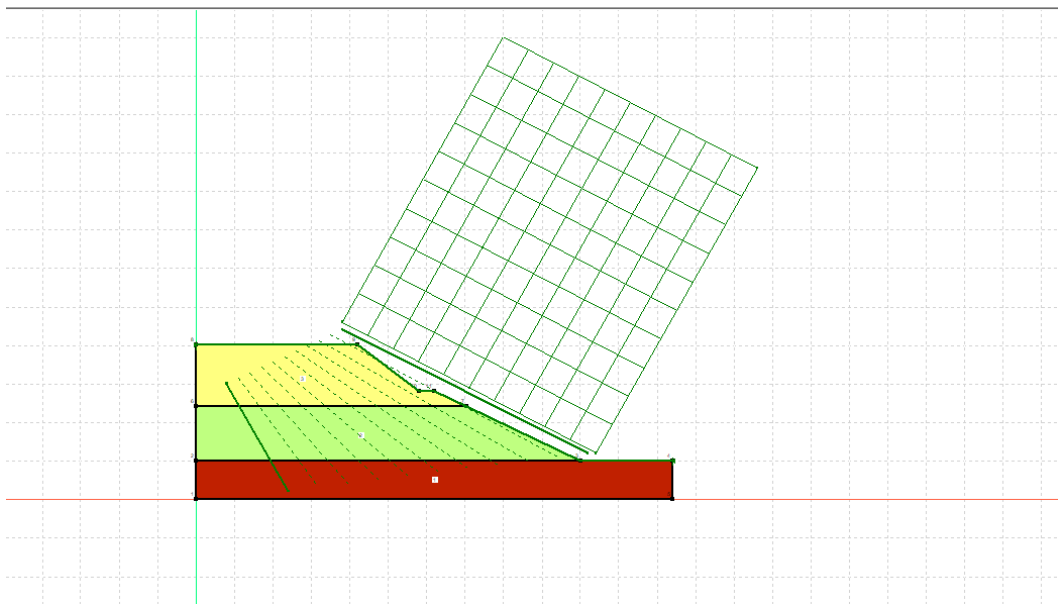
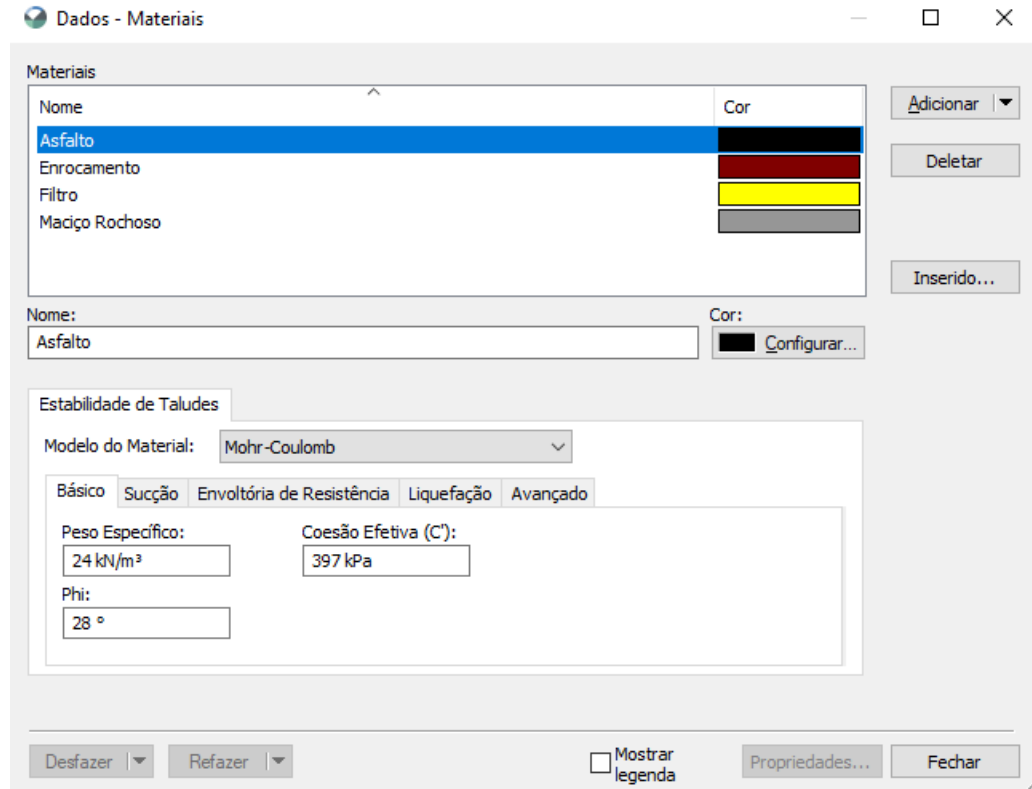


Figura 5 - Definição dos materiais



O programa Geoslope, desenvolvido pela empresa Geostudio International Ltd, é um software que tem se tornado cada vez mais acessível para a engenharia civil, principalmente no que diz respeito à modelagem geotécnica. Embora atribuído principalmente à análise de estabilidade de encostas naturais e artificiais, o programa também é utilizado para fins como a observação de distribuição de tensões lineares no solo e de infiltrações de zonas confinadas e não confinadas.

A ferramenta do Geoslope utilizada na análise deste trabalho foi o SLOPE/W. A partir da geometria do maciço que se quer analisar e de propriedades do solo como a coesão, o ângulo de atrito e o peso unitário, é possível modelar simplificada e com condições reais de campo o estado em que se encontra o bloco de solo em questão, se este corre risco de deslizamentos e o fator de segurança pontual da estrutura, ou seja, o quão resistente ele se encontra em cada coordenada referente a uma pequena região de solo.

A interpretação dos resultados obtidos pelo software abrange os seguintes aspectos:

- Figurar a superfície de deslizamento mínimo e o fator de segurança para cada quota de solo e/ou para toda a estrutura;
- Exibir as forças que atuam em cada fatia de solo, bem como o estado de tensões geral do maciço;
- Contornar, por meio de vários métodos de análise, os fatores de segurança bem como

parâmetros relacionados a eles e que são diretamente ligados às propriedades do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, estão apresentados os resultados das simulações numéricas de fluxo e estabilidade de taludes de uma barragem com núcleo argiloso e de uma barragem com núcleo asfáltico.

PERDA DE CARGA

As Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam os resultados da perda de carga total em termos de linhas equipotenciais para a simulação da barragem hipotética de enrocamento com núcleo de argila ($H=60,00\text{m}$; $b= 8,00\text{m}$; $B=20,00\text{m}$) e com núcleo asfáltico ($b=B=0,50\text{ m}$; $1,00\text{ m}$; $1,50\text{ m}$).

Figura 6 - Perda de carga para a barragem de solo com núcleo argiloso

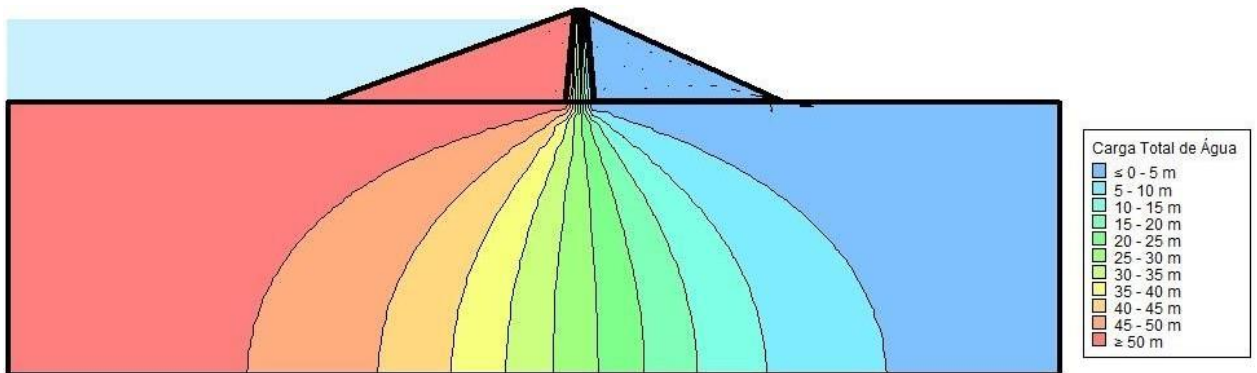


Figura 7 - Perda de carga para a barragem de solo com núcleo asfáltico ($B=0,50\text{ m}$)

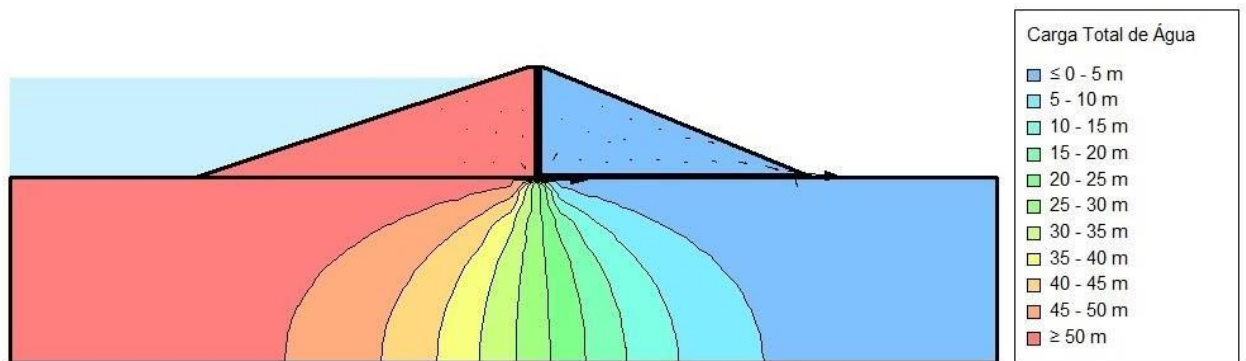


Figura 8 - Perda de carga para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=1,00 m)

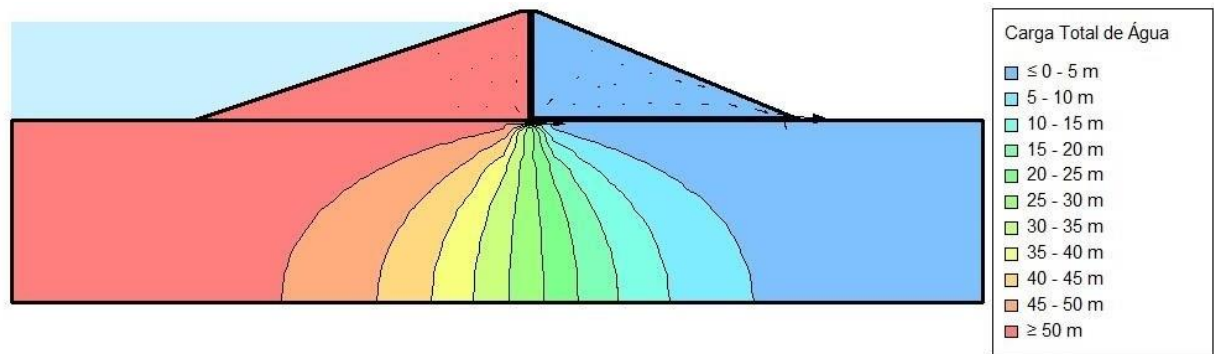
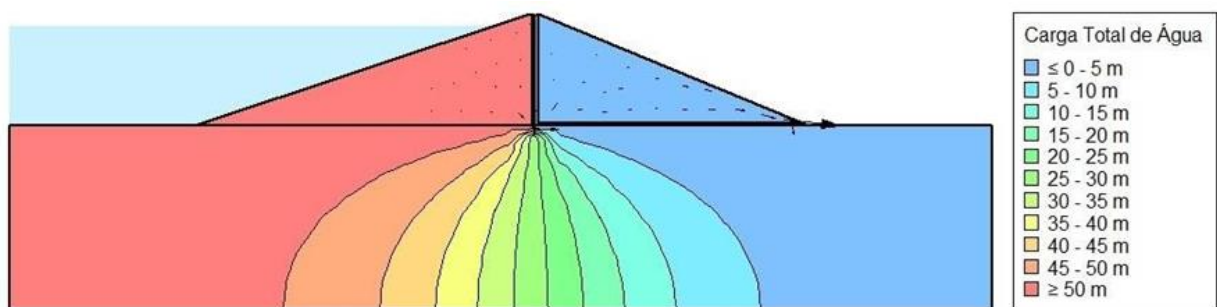


Figura 9 - Perda de carga para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=1,50 m)



A partir da análise da perda de carga das simulações, constata-se que todas as situações apresentam comportamento similar, ou seja, não há uma perda de carga expressiva entre o enrocamento e o núcleo de argila, bem como entre o enrocamento e o núcleo asfáltico. Isso confirma um fato esperado, uma vez que o coeficiente de permeabilidade do enrocamento é muito maior do que a do núcleo de argila e núcleo asfáltico.

É notório também que a linha freática apresentou um comportamento condizente com a teoria, ou seja, entrada superior perpendicular para o talude de montante e saída tangente ao filtro e daí direcionada além do talude de jusante.

POROPRESSÕES

As Figuras 10, 11, 12 e 13 apresentam as isolinhas de poropressões geradas pela percolação de água decorrente do fluxo da barragem hipotética de enrocamento com núcleo de argila (H=60,00m; b= 8,00m; B=20,00m) e com núcleo asfáltico (b=B=0,50 m; 1,00 m; 1,50 m).

Figura 10 - Dissipação de poropressões para a barragem de solo com núcleo argiloso (B=20,00 m)

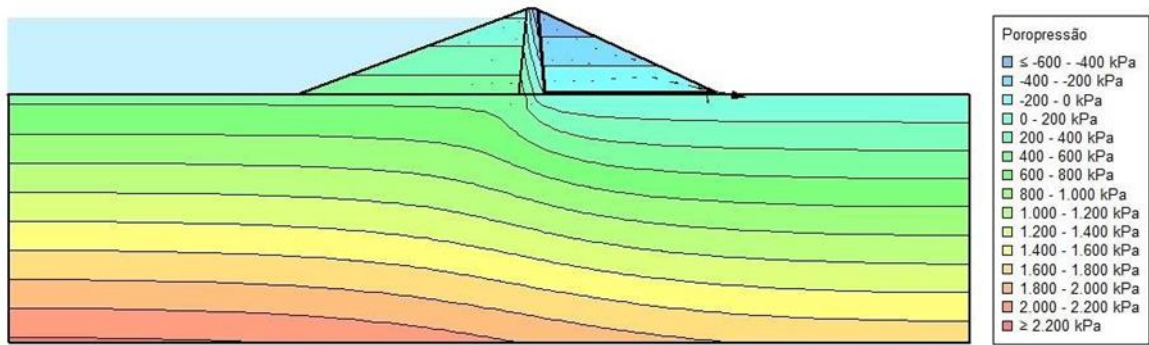


Figura 11 - Dissipação de poropressões para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=0,50 m)

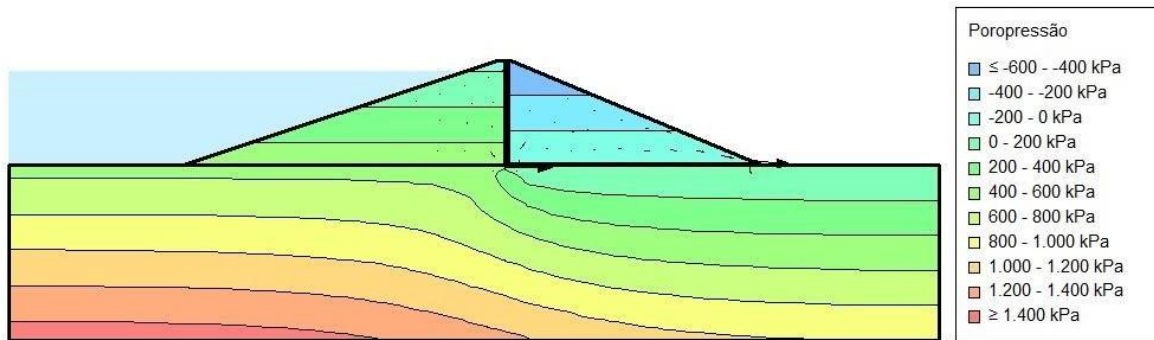


Figura 12 - Dissipação de poropressões para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=1,00 m)

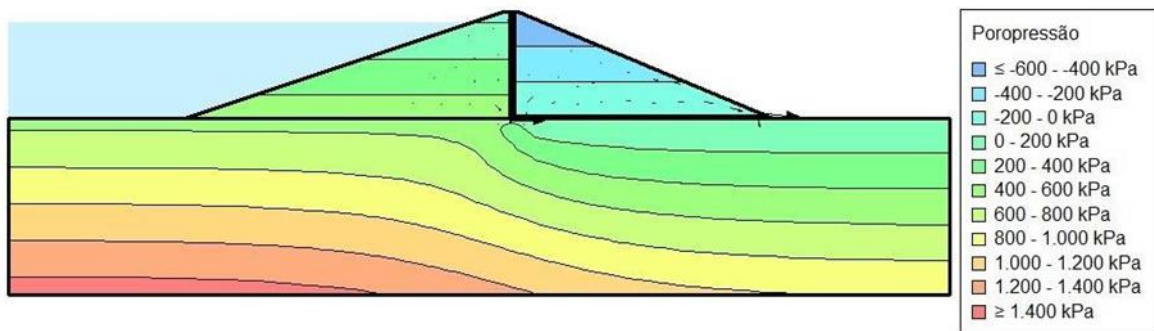
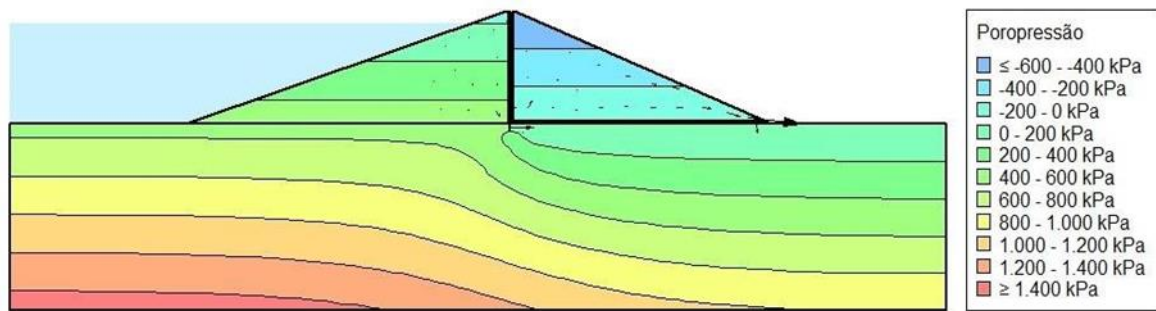


Figura 13 - Dissipação de poropressões para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=1,50 m)



Percebe-se que o filtro juntamente com o núcleo argiloso ou asfáltico, cumpre bem com o seu objetivo, pois o talude de jusante apresenta poropressões muito pequenas. As isolinhas de poropressão, tanto para o núcleo argiloso quanto para o núcleo asfáltico, demonstram que as pressões neutras decrescem à medida que se afastam do talude de montante.

ESTABILIDADE DE TALUDES

As Figuras 14, 15, 16 e 17 apresentam os resultados das superfícies críticas e dos fatores de segurança para a barragem hipotética de enrocamento com núcleo argiloso (H = 60,00 m; b=8,00 m; B=20,00 m) e com núcleo de concreto asfáltico (b=B=0,50 m; 1,00 m; 1,50 m).

Figura 14 - Superfície crítica de ruptura e fator de segurança (FS=2,627) para a barragem de solo com núcleo de argila (B=20,00 m)

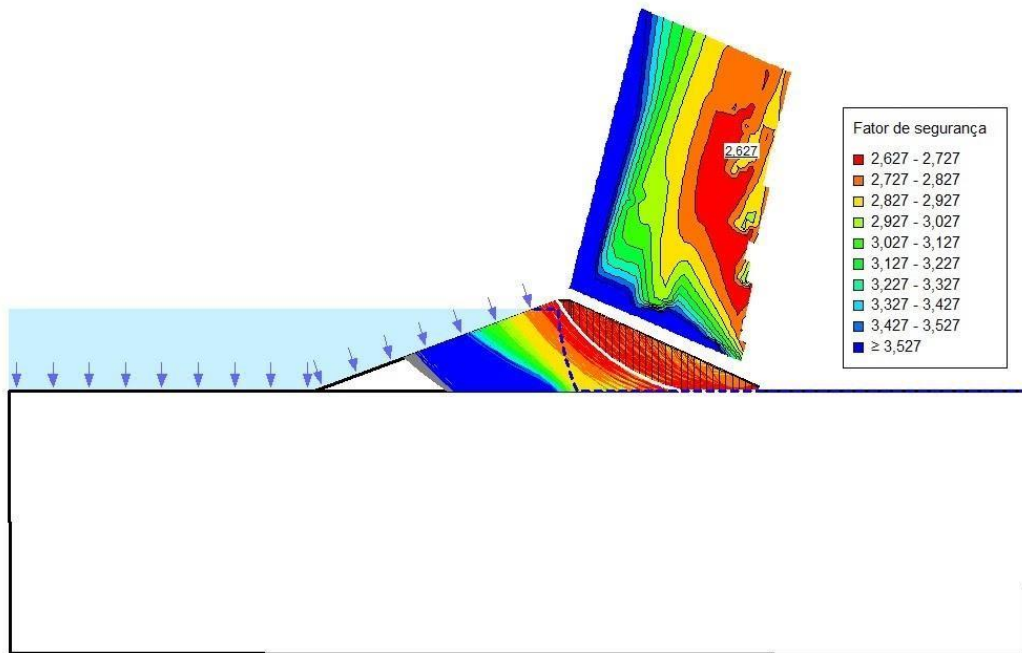


Figura 15 - Superfície crítica de ruptura e fator de segurança (FS=2,524) para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=0,50 m)

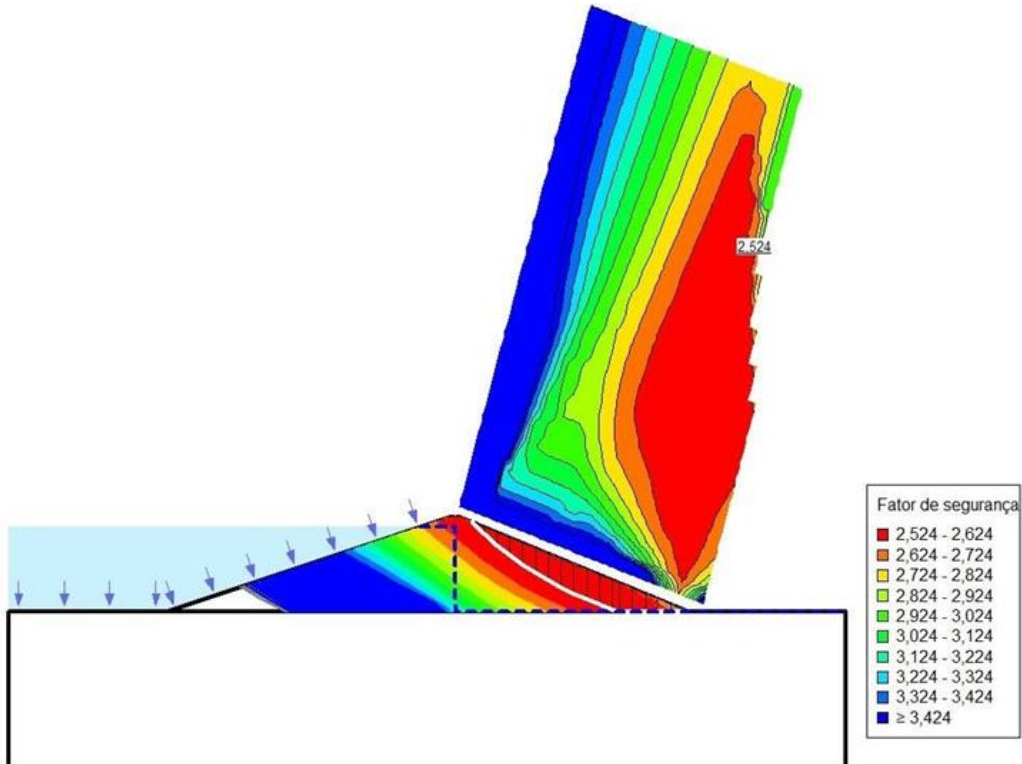


Figura 16 - Superfície crítica de ruptura e fator de segurança (FS=2,521) para a barragem de solo com núcleo de concreto asfáltico (B=1,00 m)

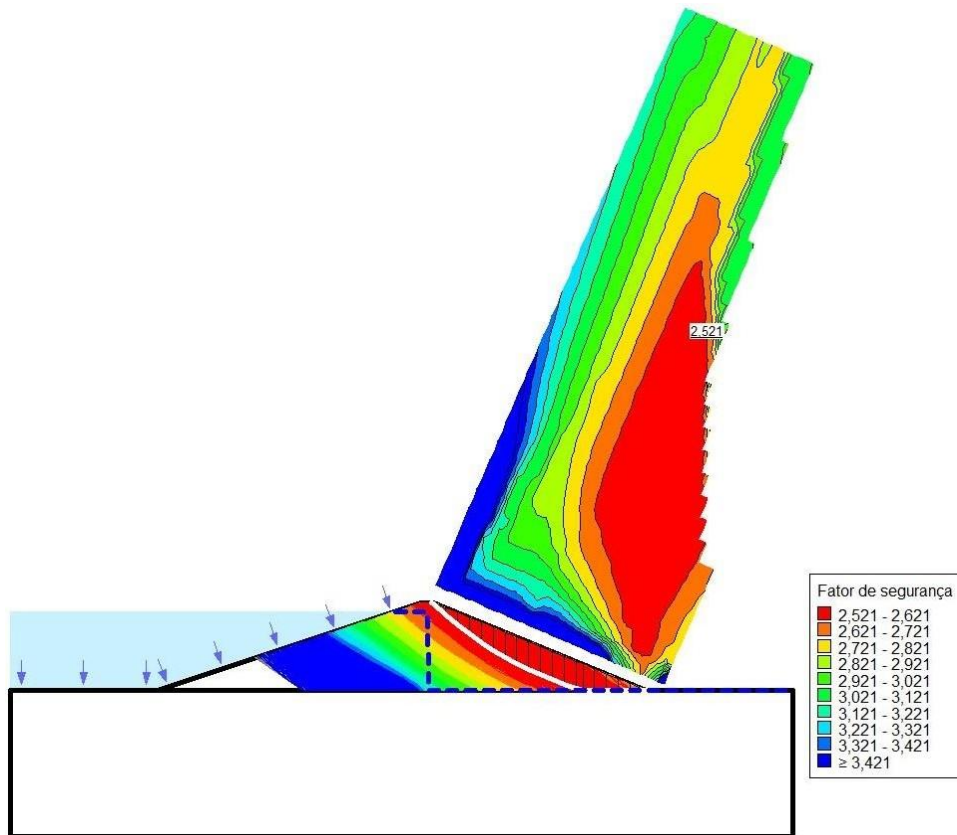
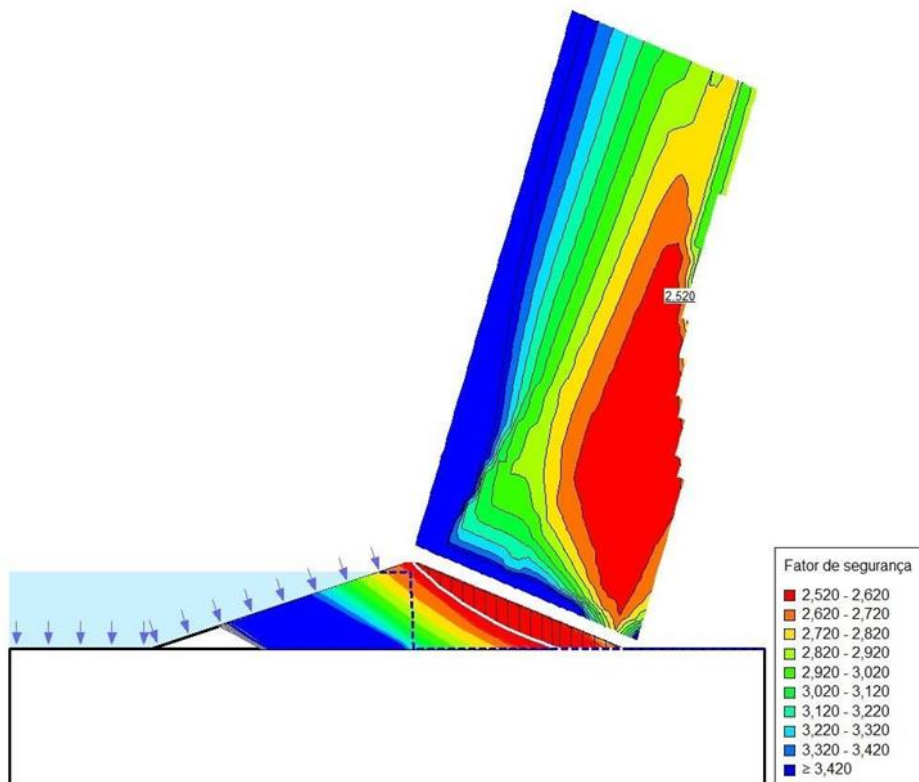


Figura 17 - Superfície crítica de ruptura e fator de segurança (FS=2,520) para a barragem de solo com núcleo asfáltico (B=1,50 m)



A partir da análise das simulações, observou-se que os fatores de segurança permaneceram constantes para todas as situações da barragem de enrocamento com núcleo asfáltico, apresentando valores em torno de $FS=2,5$, enquanto que, para a barragem de enrocamento com núcleo asfáltico, esse valor foi de $FS=2,627$.

Na comparação entre os materiais, o fator de segurança é maior para o caso da barragem com núcleo de argila em detrimento da barragem de núcleo asfáltico. Além disso, ao comparar as barragens com núcleo asfáltico entre si, percebe-se a diminuição do fator de segurança à medida que aumenta a largura do núcleo.

No que diz respeito às superfícies de ruptura, observa-se que estas tangenciam apenas os taludes de montante para todas as situações, exceto para o núcleo argiloso. Nessa situação, a superfície de ruptura intercepta também a região do núcleo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que para os dois materiais empregados no núcleo, as barragens apresentaram comportamento satisfatório nas análises de percolação e estabilidade de taludes. O núcleo asfáltico, apesar de possuir uma espessura bem menor, conseguiu provocar uma perda de carga semelhante ao do núcleo argiloso, isso se deve em grande parte ao baixíssimo coeficiente de permeabilidade do asfalto.

Por fim, na análise de estabilidade, todas as barragens citadas neste trabalho apresentaram Fator de Segurança muito acima do mínimo considerado seguro, que, segundo a literatura, gira em torno de 1,5 para barragens em operação.

REFERÊNCIAS

CIRILO, J. A.. Políticas públicas de recursos hídricos para o semi-árido. Estudos Avançados (USP. Impresso), v. 22, p. 61-82, 2008.

DUTRA, VINÍCIUS ARAÚJO DE SOUZA. Projeto de Estabilização de Taludes e Estruturas de Contenção englobando Dimensionamento Geotécnico e Estrutural. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

FALCÃO, PAULO ROBERTO F. (2007). Estudo das Propriedades Mecânicas e Hidráulicas de Concretos Asfálticos para Aplicação em Barragens. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

GEORIO. Secretaria Municipal de Obras. Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GEORIO). Manual Técnico de Encostas: Análise e Investigação. 2 ed. Rio de Janeiro, 2000.

GEOSLOPE 2018 R2. Seep/W for poropressions analysis – User’s Guide. Geoslope International Ltd. Geoslope 2018 R2. Slope/W for slope stability analysis – User’s Guide. Geoslope International Ltd. 2018.

GUIMARÃES, R. C. Barragens com Núcleo de Concreto Asfáltico – Análise do Comportamento Mecânico e Hidráulico. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 076/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2012.

MICHELUZZI, A. G. Controle de qualidade de uma barragem de enrocamento com núcleo asfáltico caso UHE JIRAU. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

OLIVEIRA, DESIREÉ ALVES DE. Análise do fluxo d’água na barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açú/RN / Desireé Alves de Oliveira. – Natal, RN, 2014.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. Barragens de Terra: Princípios Básicos e Análise da Estabilidade. UFPB -Campina Grande: REENGE, 2001.

WANG, W.; FENG, S.; ZHANG, Y. Investigation of interface between asphalt core and gravel transition zone in embankment dams. Construction and Building Materials, v. 185, p. 148–155. China, 2018.

LIMA, A. N. Otimização da impermeabilidade do núcleo de uma barragem de terra com base no coeficiente α /LIV. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.