

CARACTERIZAÇÃO HIDROMECAÂNICA DE SOLO RESIDUAL BASÁLTICO DO MUNICÍPIO DE FREDERICO WESTPHALEN/RS PARA USO EM BARRAGENS DE TERRA HOMOGÊNEA DE PEQUENO PORTE

Ana Paula Kamphorst

Engenheira Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI,
Campus Frederico Westphalen.
kamphorst.ana@hotmail.com

Tamires Suani Calgare

Engenheira Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI,
Campus Frederico Westphalen.
tamirescalgare@hotmail.com

Thaís Aquino dos Santos

Doutoranda em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
thaiis_as@hotmail.com

Fábio Dischkaln do Amaral

Professor, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Campus
Frederico Westphalen.
amaral@uri.edu.br

Resumo. Este trabalho resulta do estudo do comportamento hidromecânico de um solo oriundo do município de Frederico Westphalen/RS para uso em barragens de terra homogênea de pequeno porte. A metodologia consistiu em ensaios de caracterização física, compactação na energia Proctor normal, permeabilidade a carga variável e cisalhamento direto nas condições natural e inundada. Além disso, foram analisadas quatro geometrias quanto à percolação e estabilidade, realizadas no software GeoStudio. Através dos ensaios constatou-se que o solo é composto majoritariamente por materiais finos, com coeficiente de permeabilidade de $7,81 \times 10^{-8}$ cm/s, consoante com a utilização em barragens de terra. O ensaio de cisalhamento direto demonstrou que na condição inundada houve redução nos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Quanto às análises, a geometria provida de tapete drenante aumentou em aproximadamente 200% os fatores de segurança, se comparada à mesma

seção transversal sem drenos, mostrando a importância do sistema de drenagem em maciços terrosos.

Palavras-chave: Barragens de terra homogênea. Resistência ao cisalhamento. Permeabilidade.

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos, o barramento de águas é utilizado pelo homem com as mais diversas finalidades (COSTA, 2012). O Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (2002) conceitua as barragens como estruturas transversais a um curso d'água, com a finalidade de criar um reservatório, regularizando as vazões do rio ou de um fluído qualquer. Apesar de o conceito prever somente a acumulação de água, a Lei 12.334/2010 afirma que são consideradas barragens quaisquer estruturas presentes em cursos de águas, permanentes ou temporários, que tenham finalidade de contenção ou

acumulação de substâncias líquidas ou misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Independentemente do tipo de barragem, o seu projeto deve seguir três princípios básicos: (a) Princípio do controle de fluxos, onde a montante deve-se possuir o máximo de vedação e a jusante deve-se facilitar a drenagem; (b) Princípio da estabilidade, garantindo o equilíbrio em várias situações de carga, e; (c) Princípio da compatibilidade das deformações, através da compressibilidade dos materiais e das fundações (CRUZ, 1996).

Segundo Massad (2010), no Brasil, as condições topográficas e a disponibilidade dos materiais facilitam o uso de barragens de terra. O autor ainda afirma que se comparadas às barragens de concreto massa, as barragens de terra podem chegar a um custo cinco vezes menor.

Quanto à sua utilização, Aguiar (2014) cita que no país as barragens de terra são, geralmente, utilizadas para geração de energia elétrica, visto que as condições topográficas são favoráveis. Frederico Westphalen localiza-se em uma região que favorece a implantação de pequenas centrais hidrelétricas, graças a sua localização próxima a bacia hidrográfica do rio Uruguai. Além disso, o município possui bom desempenho agrícola, fazendo com que a utilização de barragens de terra para a irrigação seja uma alternativa viável.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo acerca das características de resistência e permeabilidade de um solo residual basáltico, oriundo do município de Frederico Westphalen/RS, tendo em vista a construção de barragens de terra homogênea. O estudo ainda pretende contribuir para o conhecimento dos materiais disponíveis na região, buscando a redução de custos, impactos ambientais e sociais deste tipo de obra.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Barragens de terra

Por definição, barragens de terra são estruturas de solo compactado que resistem ao deslizamento e tombamento através do seu peso próprio, com finalidade de represar e desviar água (STEPHENS, 2001).

As barragens de terra, quando homogêneas, são formadas de um único material que deve possuir permeabilidade suficientemente reduzida, após a compactação, para permitir níveis aceitáveis de percolação.

O projeto de barragens de terra deve controlar o fluxo de água através do corpo e da fundação da barragem, evitando quaisquer chances de o solo ser carregado pela água, além de considerar a estabilidade externa (taludes dos espaldares) e a estabilidade interna ou geral (barragem mais fundação) (CRUZ, 1996).

2.2 Princípios básicos de projetos de barragens

Em obras de barragens é necessário um conhecimento completo das características dos solos e das rochas, tanto do maciço quanto da fundação, no que se refere à estabilidade e à estanqueidade.

Resistência ao cisalhamento. Na existência de superfícies de terrenos não horizontais, como os taludes, são gerados esforços tangenciais que visam mover o solo para as regiões mais baixas. A essa movimentação de solo dá-se o nome de escorregamento de taludes (MEIRELLES, 2011). O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo em taludes naturais ou construídos (GERSCOVICH, 2009).

De acordo com Massad (2010), os métodos para a análise da estabilidade de taludes,

atualmente em uso, baseiam-se na hipótese de haver equilíbrio numa massa de solo tomada como corpo rígido-plástico, na iminência de entrar em processo de escorregamento (equilíbrio-limite). Fernandes (1998) expõe que os métodos de verificação da estabilidade de taludes fundamentam-se no equilíbrio de forças atuantes na base de uma superfície de escorregamento predeterminada, onde as relações das forças solicitantes com as forças ao cisalhamento definem um fator de segurança FS, que deve ser maior que 1. A Tabela 1 representa os fatores de segurança a serem considerados nessas situações.

Tabela 1: Fatores de segurança utilizados em análises de estabilidade para barragens.

Condições de solicitação	Talude	FS mínimo
Final de construção	Montante	1,3
	Jusante	1,3
Rebaixamento do reservatório	Montante	1,1
Regime permanente de operação	Montante	1,5
	Jusante	1,5

Fonte: Cruz, 1996.

Marangon (2004) destaca que uma das causas externas que causa movimentações de massa é a inclinação dos taludes, que resulta num acréscimo das tensões cisalhantes, de forma a igualar ou superar a resistência intrínseca do solo levando o maciço à condição de ruptura. Com isso, torna-se evidente a importância do correto dimensionamento dos paramentos, tanto de jusante quanto de montante. A Tabela 2 apresenta sugestões para inclinações de taludes em função do material constituinte do maciço. Ou seja, para a escolha adequada das inclinações a serem utilizadas nos taludes, deve-se antes analisar o material quanto ao seu comportamento hidromecânico.

Tabela 2: Inclinações de taludes sobre fundações estáveis.

Esvaziamento rápido	Grupo de solo*	Montante	Jusante
Não	GW, GP, SW, SP	Não adequado	Não adequado
	GC, GM, SC, SM	2,5 : 1	2,0 : 1
	CL, ML	3,0 : 1	2,5 : 1
	CH, MH	3,5 : 1	2,5 : 1
Sim	GW, GP, SW, SP	Não adequado	Não adequado
	GC, GM, SC, SM	3,0 : 1	2,0 : 1
	CL, ML	3,5 : 1	2,5 : 1
	CH, MH	4,0 : 1	2,5 : 1

Fonte: Costa e Lança, 2001.

Permeabilidade. Em barragens de terra, um solo permeável facilita a percolação da água a partir da face de montante em direção a face de jusante. A Tabela 3 apresenta as faixas de valores para coeficientes de permeabilidade de acordo com o material e a região de emprego.

Tabela 3: Valores para coeficientes de permeabilidade.

Material	Região	k_{min} (cm/s)	k_{max} (cm/s)
Areia Silto Argilosa	Aba Montante	9×10^{-7}	9×10^{-6}
	Argila Compactada	9×10^{-8}	9×10^{-7}
Areia Silto Argilosa	Aba Jusante	9×10^{-7}	9×10^{-6}
	Argila Compactada	9×10^{-8}	9×10^{-7}
Areia	Drenos e Tapete Permeável	10^{-2}	10^{-2}
	Material Impermeável	Camada Imperm.	10^{-10}

Fonte: Adaptado de Saré, 2003.

Massad (2010) afirma que quanto menores forem os vazios nos solos e as dimensões de suas partículas, conseqüentemente, menores serão os coeficientes de permeabilidade.

No que tange o fluxo de água em barragens, não menos importante é a permeabilidade da fundação. Segundo Meirelles (2011) as fundações de uma barragem de terra devem possuir resistência e estanqueidade suficientes para dar estabilidade ao maciço, estando diretamente ligada à escolha da seção a ser construída.

3. PROCESSOS METODOLÓGICOS

3.1. Jazida de solo

O solo é proveniente da jazida de Volta Grande, no município de Frederico Westphalen/RS, localizada na BR 386, km 39, com as seguintes coordenadas: latitude 27°24'9.35" S e longitude 53°24'28.93" W. No ato de coleta, as amostras de solo foram retiradas do horizonte de transição BC da jazida, de forma deformada, para então serem acondicionadas no Laboratório de Solos da URI, campus Frederico Westphalen/RS. A Figura 1 representa a jazida de Volta Grande, onde foi retirado o solo em questão.

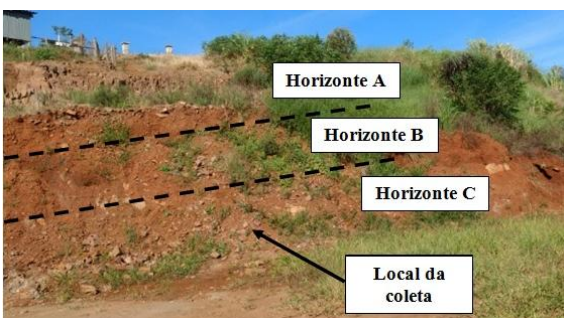


Figura 1: Jazida de solo de Volta Grande

3.2. Ensaios de caracterização física

Ensaio de granulometria. A análise granulométrica foi realizada com base nas orientações da norma ABNT NBR 7181/2016.

Optou-se por realizar o ensaio com e sem o uso de agente defloculante.

Índices de consistência. O limite de liquidez e o limite de plasticidade foram obtidos de acordo com as diretrizes apresentadas nas normas ABNT NBR 6459/2016 e ABNT NBR 7180/2016, respectivamente.

Os resultados da análise granulométrica e limites possibilitaram a classificação do solo pelos sistemas tradicionais SUCS e AASHTO/TRB.

3.3. Ensaios de caracterização hidromecânica

Ensaio de compactação da energia Proctor normal. O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a ABNT NBR 7182/2016. Como o material de estudo não é totalmente passante na peneira de número 4 (4,8 mm), os corpos de prova foram moldados no cilindro grande, como preconiza a norma, levando em consideração a energia Proctor normal.

Foram compactados cinco corpos de prova, para a obtenção de dois pontos no ramo seco, um ponto próximo a umidade ótima, e dois pontos no ramo úmido da curva de compactação, visando à obtenção do teor ótimo de compactação, que permite a realização dos demais ensaios.

Ensaio de permeabilidade do solo. A determinação do coeficiente de permeabilidade fundamenta-se no ensaio descrito pela ABNT NBR 14.545/2000, e foi realizado pelo método B da norma, visto que o laboratório não dispõe dos equipamentos necessários a realização do ensaio pelo método A.

Os corpos de prova foram compactados com uma amostra do solo passante na peneira de número 10 (2 mm), considerando o teor ótimo de compactação. O ensaio foi realizado

até a obtenção de 4 coeficientes de permeabilidade relativamente próximos. Posteriormente a execução do ensaio, calculou-se os coeficientes de permeabilidade, de acordo com a expressão Eq. (1):

$$k = \frac{aH}{A\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

O coeficiente de permeabilidade deve ser expresso à temperatura de 20°C, portanto, para a correção da temperatura foi utilizada a expressão Eq. (2):

$$k_{20} = R_t \times k \quad (2)$$

Ensaio de cisalhamento direto. O ensaio foi realizado de acordo com a normativa americana ASTM: D3080-11, com intuito de obter a envoltória de resistência do solo e seus principais parâmetros: coesão e ângulo de atrito. O ensaio realizou-se em uma prensa de cisalhamento direto, composta por caixa bipartida, que impõe uma tensão cisalhante na parte superior, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Inicialmente, foram moldados os corpos de prova no teor ótimo de compactação, na energia de compactação Proctor Normal, sendo esculpados e extraídos os corpos de provas cúbicos, com dimensões de 5 cm x 5 cm x 2 cm. Os ensaios foram realizados nos estados natural (teor ótimo) e inundado, a velocidade de 0,1667 mm/min, sendo ensaiados em tensões normais de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa.

Para cada tensão normal aplicada, obteve-se um valor de tensão cisalhante de ruptura. Após o ensaio, realizaram-se o traçado da envoltória de ruptura, gráficos de tensão cisalhante versus deformação horizontal e variação volumétrica versus deformação horizontal.

3.4. Análise de percolação e estabilidade

Para a realização das análises, foram adotadas seções transversais hipotéticas. O perfil da barragem a ser estudado foi considerado fundado sobre rocha, não influenciando nos parâmetros de estabilidade e permeabilidade do maciço. A Tabela 4 representa as análises realizadas e suas peculiaridades.

Tabela 4: Análises de percolação e estabilidade realizadas.

Número análise	Talude montante	Talude jusante	Drenos
1	3,0x1,0	2,5x1,0	Não
2	3,5x1,0	3,0x1,0	Não
3	4,0x1,0	3,5x1,0	Não
4	3,0x1,0	2,5x1,0	Tapete drenante

Adotou-se a altura de 10 m, sendo considerada uma barragem homogênea de pequeno porte, de acordo com a classificação de Massad (2010). A largura da crista foi adotada como 6 m, para que a mesma possa ser utilizada como estrada, com duplo sentido de tráfego. Este valor está de acordo com o mínimo previsto por Eletrobrás (2000).

Após a definição dos perfis, os mesmos foram lançados no programa SEEP/W, utilizando as propriedades do solo resultantes dos ensaios já citados, sendo obtidas as linhas de fluxo no interior do maciço. Para o desenvolvimento da análise, o programa utilizou a análise de estado estável, e a camada de solo foi considerada saturada e não saturada, visto que a altura da água do reservatório não atinge o topo do maciço. As malhas dos elementos finitos foram definidas com dimensões aproximadas de 1,00 m por 1,00 m. Também foram definidas duas condições de contorno: Saturada no talude de montante (até o nível do reservatório), com nível constante de 9 m de água, e drenagem no

restante da seção transversal, considerando o fluxo total de água pelo maciço.

Na seção transversal que houve a adição do tapete drenante, o mesmo foi considerado de areia, com coeficiente de permeabilidade de 10^{-2} cm/s, conforme a Tabela 3, para areias de drenos. O tapete drenante foi considerado de 1,0 m de altura, conforme Meirelles (2011).

Posteriormente, tornou-se possível a utilização do SLOPE/W para a verificação da estabilidade, utilizando o método de Morgenstern & Price para verificar o fator de segurança dos taludes de jusante. Meirelles (2011) afirma que após a percolação da água de montante para jusante, a pressão de percolação é favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à do talude de jusante, justificando as análises somente para este último. O modelo de análise do material utilizado foi o de Mohr-Coulomb, e os dados de resistência e peso específico foram adotados de acordo com os resultados dos ensaios laboratoriais. Para a determinação da superfície de ruptura foi utilizado o método de entrada e saída, levando em consideração intervalos em que provavelmente se encontraria a superfície de ruptura. Na seção transversal que houve a adição do tapete drenante, o mesmo foi considerado de areia, com peso específico de $17,0 \text{ kN/m}^3$, coesão nula, e ângulo de atrito de 30° .

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização física e hidromecânica

A síntese dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização física e mecânica está representada na Tabela 5.

A análise granulométrica permite notar o predomínio de materiais com granulometria fina, com aproximadamente 52% passante na peneira de número 200 (0,075 mm). Como o solo foi retirado do horizonte de transição BC

da jazida, o fato de haver grande incidência de pedregulhos é explicado, visto que este horizonte apresenta características semelhantes a da rocha mãe.

Tabela 5: Síntese dos resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica

Peso esp. real dos grãos (kN/m^3)	30,09
Limite de liquidez (%)	54
Limite de plasticidade (%)	36
Índice de plasticidade (%)	18
% pedregulho	34/34*
% areia grossa	4/4*
% areia média	5/8*
% areia fina	7/15*
% silte	18/25*
% argila	32/14*
Classificação SUCS	MH
Classificação AASHTO	A-7-5
Umidade ótima (%)	29,30
Peso esp. aparente seco máx. (kN/m^3)	14,60

*Análise granulométrica sem defloculante

É possível perceber que a curva de solo sem defloculante (SD) apresenta a maior porcentagem de solo classificado como silte (25%), enquanto na curva com defloculante (CD), a maior quantidade de solo é classificada como argila (32%). Esse resultado está de acordo com o esperado, visto que as partículas de solo se agregam formando grãos maiores, e o hexametáfosfato de sódio tem por finalidade possibilitar que as mesmas sedimentem isoladamente.

O ensaio de peso específico dos grãos já foi realizado por Pessotto (2017), sendo obtidos os valores médios de peso específico dos sólidos de $3,0085 \text{ g/cm}^3$.

Nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade foram obtidos os valores de 54% e 36%, respectivamente. A obtenção de tais valores possibilitou a obtenção o índice de plasticidade, que para o solo em questão é de 18%, caracterizando uma argila altamente

plástica, segundo dados da literatura (CAPUTO, 2015). O solo pode ser classificado segundo a metodologia AASHTO/TRB (*Transportation Research Board*) como solos argilosos no subgrupo A-7-5, podendo ser altamente elástico e sujeito a alterações elevadas de volume. Já segundo a classificação unificada (SUCS), o solo é classificado como silte inorgânico de alta compressibilidade (MH).

A realização do ensaio de compactação do solo na energia Proctor Normal teve como objetivo a obtenção do teor de umidade ótima e do peso específico aparente seco máximo do solo em estudo.

O solo em estudo obteve peso específico aparente seco máximo de 14,60 kN/m³ e 29,3% de teor de umidade ótima para a energia Proctor normal. O baixo peso específico, e alto teor de umidade do solo podem ser explicados visto que o solo possui predomínio de partículas finas.

Ensaio de permeabilidade. O ensaio de permeabilidade visou à obtenção do coeficiente de permeabilidade do solo em estudo. Foram obtidos quatro coeficientes de permeabilidade, conforme prescrito na norma, e então foi realizada a média dos mesmos. Na Tabela 6 estão representados os coeficientes de permeabilidade obtidos durante o ensaio, o valor da relação entre a viscosidade da água na temperatura de ensaio e a viscosidade da água a 20°C, além dos coeficientes de permeabilidade corrigidos à temperatura de 20°C.

O solo apresentou coeficiente de permeabilidade médio (k) de $7,81 \times 10^{-8}$ cm/s, valor que está de acordo com os valores apresentados na Tabela 3 para uso em barragens de terra. Lambe e Whitman (1969) classificam o solo como praticamente impermeável ($k \leq 10^{-8}$ cm/s).

Tabela 6 – Coeficientes de permeabilidade resultantes

K (cm/s)	RT	K20 (cm/s)
7,70E-08	0,93	7,16E-08
7,37E-08	1,025	7,56E-08
8,70E-08	0,952	8,28E-08
8,63E-08	0,952	8,22E-08
Valor médio do coeficiente de permeabilidade (cm/s)		$7,81 \times 10^{-8}$

Ensaio de cisalhamento direto. Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para a energia normal de compactação, nas condições natural e inundada, visando verificar a variação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito. A Figura 2 representa o gráfico de tensão cisalhante versus deformação horizontal para as duas condições de umidade.

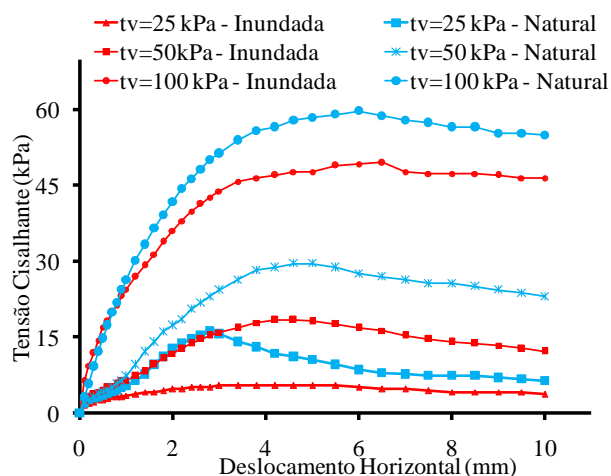


Figura 2: Tensão Cisalhante versus Deformação horizontal

Analisando a Fig. 2 verifica-se que quanto maior a tensão normal aplicada no solo maior é a tensão cisalhante suportada pelo mesmo. Quanto à variação da umidade percebe-se que com a inundação do solo obteve-se menores tensões cisalhantes máximas. O comportamento é explicado, pois, quando há uma diminuição da umidade ocorre um aumento da sucção, que resulta em um ganho de resistência ao cisalhamento do solo. É

possível observar que a curva de tensão cisalhante versus deformação na condição de umidade natural apresenta leves picos, podendo ser explicado visto que quanto menor a umidade do solo, maior é a rigidez do material, e por isso, o material possui uma ruptura ligeiramente frágil.

As duas curvas apresentam comportamento semelhante: acréscimo de tensão cisalhante até certo ponto, e a partir de determinado ponto ocorre um pequeno decréscimo para então as tensões permanecerem praticamente constantes.

A Figura 3 representa o gráfico de variação volumétrica versus deslocamento horizontal para as ambas as umidades.

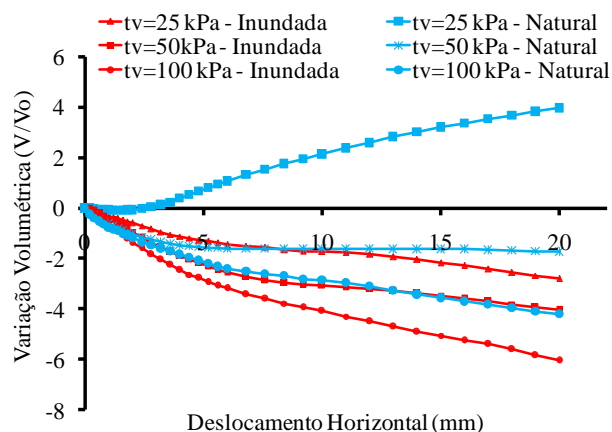


Figura 3 - Variação volumétrica versus deslocamento horizontal

Analisando a Fig. 3 nota-se que no ensaio realizado a umidade natural com tensão normal de 25 kPa é o único que apresentou dilatação, enquanto as tensões de 50 kPa e 100 kPa apresentaram redução do volume. Já durante o ensaio realizado a umidade inundada em todas as tensões normais aplicadas houve a redução do volume inicial do solo.

Comparando os dois gráficos têm-se que para as tensões normais de 50 kPa e 100 kPa ocorreu o aumento da contração do material com a inundação, e que há portanto, uma maior variação de volume. Já para a tensão normal de 25 kPa, a dilatação que ocorreu no

material no estado natural foi maior que a contração que ocorreu no estado inundado, portanto, a variação volumétrica foi menor.

Na Tabela 7 são representados os parâmetros de resistência do solo obtidos através das envoltórias de ruptura do solo.

Tabela 7 – Parâmetros de resistência do solo

Umidade	Intercepto Coesivo (kPa)	Ângulo de atrito (°)
Natural	1,2	30,24
Inundada	0	24,61

Pode-se notar que na condição natural, o solo apresentou um baixo intercepto coesivo, enquanto na condição inundada, o intercepto coesivo encontrado foi nulo. Quanto ao ângulo de atrito, pode-se notar um decréscimo do valor com a inundação do solo. Os valores podem ser considerados aceitáveis para o ensaio realizado. Corroborando isso, pode-se citar o estudo realizado por Conte (2011), no qual uma amostra de solo com granulometria e índices de consistência semelhantes ao aqui estudado, obteve parâmetros de resistência similares aos citados acima. Além disso, o autor afirma que esses valores estão próximos aos encontrados para outros solos residuais do sul do Brasil.

4.2. Análise de percolação

Após a obtenção dos parâmetros geotécnicos necessários, executou-se a análise de percolação de água através do corpo da barragem, com o uso do software SEEP/W, que se baseia na teoria dos elementos finitos para determinar as linhas freáticas e vazões no maciço. A Figura 4 mostra a representação gráfica dos resultados obtidos no SEEP/W para a análise 4. As demais representações estão apresentadas em Kamphorst (2018).

A linha piezométrica representa a divisão entre o solo considerado não saturado (acima) e considerado saturado (abaixo), enquanto ao

longo da mesma a pressão neutra é nula. Segundo Cruz (2004) as vazões normais medidas em seções transversais de barragens variam de $1,66 \times 10^{-6}$ m³/s a $3,33 \times 10^{-5}$ m³/s. Birck (2016) afirma que valores próximos de 10^{-3} m³/s são considerados valores altos e, portanto, inadequados para barragens de terra homogênea.

O SEEP/W calcula a vazão apresentada pela seção transversal proposta automaticamente. Os valores de vazões encontrados em cada análise estão dispostos na Tabela 8. Pode-se notar que os valores de vazão são baixos, sendo então, considerados aceitáveis.

Tabela 8 – Vazões encontradas nas seções transversais analisadas.

Análise	Vazão (m ³ /s)
1	$1,03 \times 10^{-7}$
2	$8,80 \times 10^{-8}$
3	$7,85 \times 10^{-8}$
4	$3,52 \times 10^{-7}$

4.3. Análise de estabilidade

A análise de estabilidade foi realizada para verificar se as dimensões dos taludes de jusante estão a favor da segurança. Foram utilizados os mesmos perfis das barragens citadas anteriormente, e também os traçados das linhas piezométricas obtidas na análise de percolação.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para duas condições de umidade (natural e inundada), visto que em uma barragem de terra ocorrem as duas situações: solo na umidade natural acima da linha piezométrica, e solo saturado abaixo da linha piezométrica, e por isso, foram obtidos dois parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Logo, foram realizadas duas análises para verificações dos fatores de segurança. As Figuras 5 e 6 mostram os resultados gráficos da análise de estabilidade número 1 para as umidades natural e inundada, respectivamente. Da mesma forma, as Fig. 7 e 8 mostram a representação gráfica das análises de número 4, nas condições natural e inundada, respectivamente. As demais representações estão apresentadas em Kamphorst (2018).

A primeira análise foi realizada na condição natural, utilizando a coesão de 1,2 kPa, e 30,24° como ângulo de atrito, enquanto a segunda análise foi realizada na condição inundada, com os parâmetros de coesão de 0 kPa, e ângulo de atrito de 24,61°. Os fatores de segurança encontrados em cada análise estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de segurança encontrados nas seções transversais analisadas

Análise	FS	FS
	Est. Natural	Est. Inundado
1	0,816	0,542
2	0,946	0,649
3	1,078	0,741
4	1,659	1,148

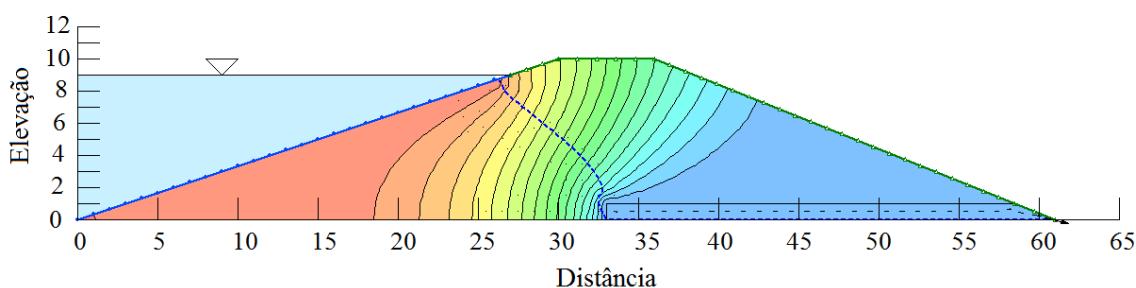


Figura 4: Representação gráfica dos resultados da análise de percolação para a seção transversal de número 4

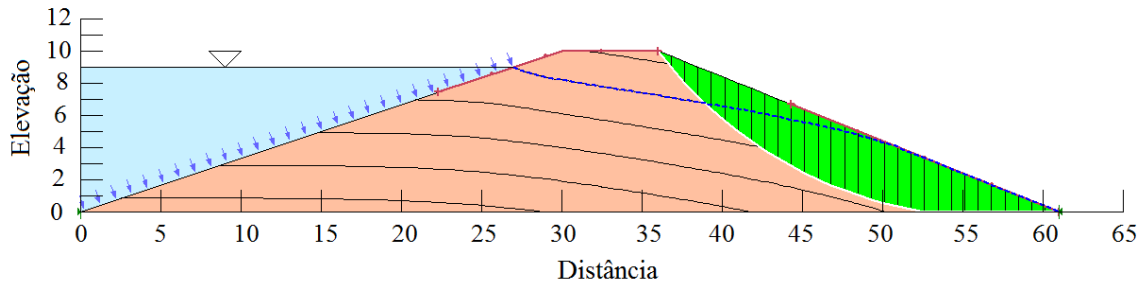


Figura 5: Resultado da análise 1 – Estado natural

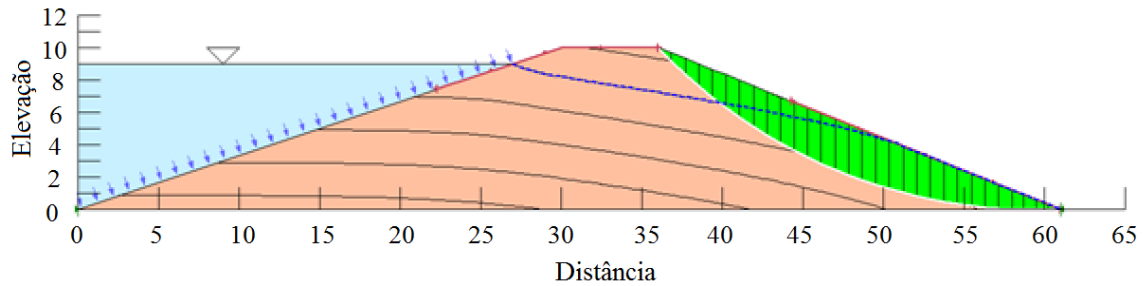


Figura 6: Resultado da análise 1 – Estado inundado

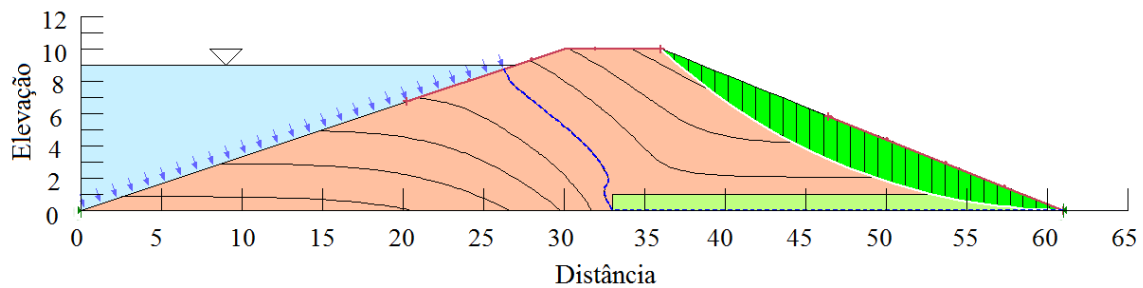


Figura 7: Resultado da análise 4 – Estado natural

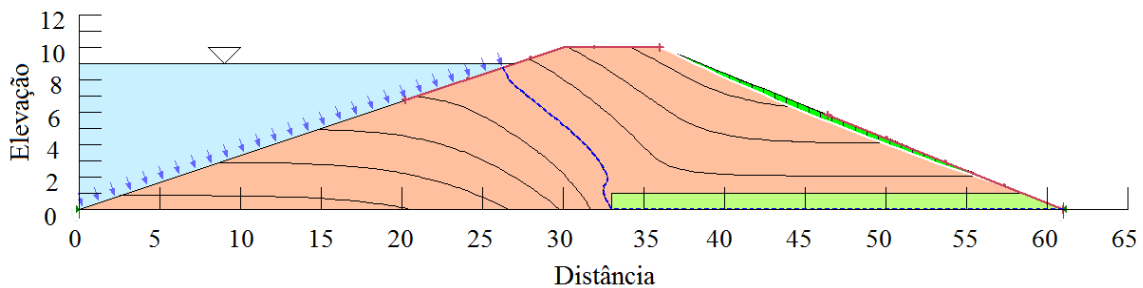


Figura 8: Resultado da análise 4 – Estado inundado

Pode-se notar que com a alteração da inclinação dos taludes ocorre um aumento de aproximadamente 16% se comparados os fatores de segurança no estado natural das análises 1 e 2. Para o estado inundado, o FS aumenta aproximadamente 20% entre as mesmas análises. Se comparadas as análises 2

e 3, na condição natural ocorre um aumento no FS de quase 14%, nas duas condições. As análises 1 e 4 possuem as mesmas inclinações de taludes, porém, na análise 4 houve a inserção de um tapete drenante. Com essa alteração o FS nas duas condições (natural e inundada) aumentou mais de 200%.

Ou seja, com a diminuição da inclinação dos taludes da barragem há um aumento do fator de segurança da mesma. Porém, esse aumento não é suficiente para atingir o limite encontrado na literatura, que é de 1,50 para o regime permanente de operação, conforme a Tabela 1. Com a adição do tapete drenante há um grande aumento neste parâmetro. Isso pode ser explicado visto que sem o dreno a área de solo saturado é maior, ou seja, mais solo se encontra na condição inundada, que apresenta menores parâmetros de resistência ao cisalhamento. Com a inserção do dreno ocorre a diminuição da área de solo saturado, e a maior parte do solo encontra-se em estado natural, apresentando maior resistência.

Portanto, pode-se notar que a única seção transversal que atende o FS proposto pela literatura é a análise 4 com o solo na condição natural. Logo, a seção transversal que apresentou melhor desempenho, tanto na percolação quanto na estabilidade, foi a barragem de terra homogênea com taludes de montante com inclinação de 3,0 x 1,0, e taludes de jusante de 2,5 x 1,0, com a adição de tapete drenante de areia.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados apresentados anteriormente, foi possível concluir que o material estudado se trata de um solo fino, com aproximadamente 52% de solo passante na peneira de 0,075 mm, altamente plástico, com coeficiente de permeabilidade de $7,81 \times 10^{-8}$ cm/s.

Nos resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento, nas duas condições em estudo, pode-se observar o aumento na tensão de cisalhamento com o acréscimo da tensão normal. Em relação aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito houve uma diminuição de ambos com a inundação do solo.

A partir da análise de percolação realizada no SEEP/W, pode-se perceber que as vazões

encontradas para os maciços em estudo foram aceitáveis, conforme a literatura. Portanto, quanto aos parâmetros de permeabilidade, o solo apresentou bom desempenho para esta determinada utilização.

Nas análises de estabilidade, foi possível perceber que os fatores de segurança ficaram abaixo dos propostos pela literatura, sendo aceitável apenas o FS da análise 4 (com utilização de tapete drenante). A utilização de um sistema de drenagem aumentou em mais de 200% os fatores de segurança em relação a uma barragem com as mesmas inclinações de taludes, porém sem o tapete drenante.

Portanto, através da análise de estabilidade, pode-se notar que o solo não apresentou boa atuação frente à resistência ao cisalhamento imposta pela barragem hipotética, e que nem a diminuição da inclinação dos taludes foi suficiente para que o FS fosse aceitável, sendo fundamental a utilização do sistema drenagem. Tais resultados permitem verificar a importância da utilização de um bom sistema de drenagem para o corpo do maciço.

Agradecimentos

Os autores agradecem a URI/Frederico Westphalen e a Universidade Federal de Santa Maria pelo incentivo e disponibilidade durante a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L.A. **Análise do Comportamento Mecânico de Solos Compactados e Estabilizados Quimicamente para Uso de Barragens**. 2014. Tese em Geotecnia. Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM Standard: D3080: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions**. United States, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica.** Rio de Janeiro. 2016.

___**NBR 6457: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização – Método de ensaio.** 2016.

___**NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez.** 2016

___**NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade.** 2016.

___**NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação.** 2016.

___**NBR 14545: Solo– Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** 2000.

BIRCK, M. **Barragens de Terra Homogênea: Uma análise Crítica entre os Projetos Empírico e Científico.** Porto Alegre, 2016.

CAPUTO, H.P.; CAPUTO, A.N. **Mecânica dos solos e suas aplicações –Fundamentos.** Vol. 1; 7ed. Rio de Janeiro, 2015.

CONTE, M.A.G. **Determinação dos Parâmetros de Resistência de um Solo em Encosta em Santa Catarina.** SIC, 2011.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens.** São Paulo, 2012.

COSTA, T; LANÇA, R. Universidade do Algarve. Núcleo de hidráulica e ambiente. **Barragens.** Faro, 2001.

CRUZ, P.T. da. **100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996

FERNANDES, M. de O. **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Felenius, Bishop e Jambu.** Revista Tecnologia, nº 19. Fortaleza, 1998.

GERSCOVICH, D.M.S. **Apostila de Estabilidade de Taludes.** Rio de Janeiro, 2009.

KAMPHORST, A.P. **Caracterização Hidromecânica de Solo Residual Basáltico Típico de Frederico Westphalen/RS para Uso em Barragens de Terra Homogênea de Pequeno Porte.** Trabalho de Conclusão de Curso, URI, Frederico Westphalen, 2018.

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics.** New York, Ed. Wiley. 553p. 1969.

Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.

MARANGON, M. **Barragens de terra e enrocamento.** Juiz de Fora: UFJF, 2004. Apostila da disciplina Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de Geotecnia.** 2ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

MEIRELLES, F.S.C. **Curso de Segurança de Barragens.** Mód. I, Unid. 9. 2011.

PESSOTTO, L. **Estudo do efeito da granulometria do material fresado para estabilização de um solo para aplicação em sub-base de pavimentos.** Trabalho de Conclusão de Curso, URI, Frederico Westphalen, 2017.

STEPHENS, K. **Manual sobre pequenas barragens de terra: Guia para a localização, projecto e construção.** 2001.