

Estabilidade dos Taludes de uma Lagoa de Decantação Considerando-se Condições de Reservatório Cheio e Rebaixamento Rápido

João Alexandre Paschoalin Filho

Universidade Nove de Julho, São Paulo, Brasil, paschoalinfilho@yahoo.com

Brenno Augusto Marcondes Versolato

Geoconceito Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, brennoversolato@hotmail.com

RESUMO: O presente trabalho traz análises de estabilidade dos taludes pertencentes a uma lagoa de decantação situada em Bragança Paulista, interior de São Paulo. A lagoa possui taludes de montante com inclinação próxima a 1,0(H):1,0(V) e jusante com inclinação de 1,5(H):1,0(V). Por meio de sondagens conduzidas, pôde-se perceber que o aterro que compõe o dique da lagoa é formado por argila arenosa pouco siltosa, de consistência mole a média e baixos valores de N_{spt} . Abaixo do aterro, nota-se uma camada de areia fina a grossa, pouco siltosa de coloração acinzentada. Para a condução das análises de estabilidade dos taludes da lagoa foi utilizado o método de Bishop Simplificado. Por se tratar o objeto de estudos em uma lagoa de decantação, também se procedeu a determinação da linha freática em cada seção. Na região compreendida pela fundação do aterro da lagoa foi considerada condição de equidade entre parâmetros de permeabilidade nas direções horizontal e vertical ($k_v=k_h$). No entanto, no corpo do aterro considerou-se relação $k_v/k_h=0,1$, tal como sugerido por CRUZ (1999). As análises de estabilidade dos taludes do dique da lagoa foram realizadas considerando-se reservatório cheio, ou seja, em sua cota de operação e rebaixado até cota mínima, considerando-se a ocorrência de possível esgotamento rápido para realização de manutenção/recuperação da mesma. De uma forma geral, as análises de estabilidade indicaram a redução dos fatores de segurança das seções dos taludes analisados comparando-se as solicitações referentes ao reservatório cheio e esgotado. Tal fato ocorre uma vez que, durante o rebaixamento do nível do reservatório, a carga estabilizante imposta pela água sobre o talude de montante não existe mais, além disso, o talude encontra-se saturado. A velocidade do rebaixamento é superior a velocidade de dissipação das pressões neutras no talude de montante, configurando-se em uma condição de solicitação em termos de tensões totais, uma vez que ocorrem condições não drenadas de resistência. Os fatores de segurança mantiveram-se dentro do especificado pela ABNT NBR 11.682/2009, de acordo com as condições e especificidades locais.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Tauldes, Lagoa de Decantação, Linha Freática.

1 INTRODUÇÃO

A obra em questão consiste em um dique componente de uma lagoa de decantação, parte integrante do sistema de tratamento de efluentes resultantes dos processos de fabricação de uma unidade fabril localizada no município de Bragança Paulista/SP.

O dique possui dimensões de 100 x 145m, altura variando entre 4,0 e 5,5m e plataforma

com cerca de 8m de largura. Seus taludes de montante possuem, de acordo com levantamento batimétrico efetuado, inclinação próxima a 1,0 (H):1,0(V) enquanto que os taludes de jusante possuem inclinação de 1,5(H):1,5(V). Os taludes de jusante são revestidos por grama, não sendo identificadas árvores ou qualquer outro tipo de vegetação de porte mais significativo; enquanto que os de montante contam com proteção superficial em enrocamento e revestimento com

manta de PEAD (Polietileno de Alta Densidade).

Ao redor da lagoa pode-se notar a existência de drenos superficiais. No dique também ocorre a existência de instrumentos instalados tais como: piezômetros e marcos superficiais para observação de deslocamentos verticais.

Durante visita “in loco” não foram constatadas trincas no corpo do talude de jusante da lagoa que indicassem movimentações ou qualquer indício de rupturas localizadas. Contudo, foram observadas em diversas regiões surgências, que em primeira observação, julga-se ser o mesmo líquido retido na lagoa, o qual vem percolando, tanto pelo corpo do talude, bem como pela sua fundação. Em algumas regiões, este fluxo é de intensidade suficiente para causar saturação do solo a jusante do talude. Em alguns taludes, observa-se surgências localizadas a partir de sua altura média ($H/2$).

De acordo com relatórios elaborados anteriormente, a condição de estabilidade dos taludes é satisfatória. Estes apresentam leituras realizadas nos instrumentos instalados e constata-se que, apesar de terem sido detectados deslocamentos nos marcos instalados, estes não demonstravam movimentação significativa do maciço. As leituras dos piezômetros também nada indicaram, na época, qualquer tipo de fenômeno que pudesse interferir na estabilidade dos taludes. Contudo, ressalta-se que estes relatórios foram emitidos no ano de 2005.

A seguir, são apresentadas fotografias colhidas, as quais ilustram o objeto de estudos deste artigo.



Figura 1. Talude de montante da lagoa revestido com manta PEAD e proteção em enrocamento.



Figura 2. Surgência de percolado constatada no pé do talude do dique.



Figura 3. Detalhe da surgência de percolado.



Figura 4. Talude de jusante.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO LOCAL

Para a caracterização do subsolo local foram realizadas sete sondagens a percussão de simples reconhecimento tipo SPT (*Standard Penetration Test*), totalizando aproximadamente 91 metros prospectados. Todas as sondagens foram realizadas de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6484/2001 – “Execução de sondagens de simples reconhecimento dos

solos”. A tabela 1 apresenta um resumo das sondagens conduzidas.

Tabela 1. Profundidade das sondagens executadas.

Sondagem	Profundidade (m)	Profundidade do N.A (m)
SP01	15,1	0,5
SP02	8,1	2,95
SP03	15,0	1,8
SP04	13,1	0,9
SP05	14,1	0,4
SP06	16,5	1,9
SP07	9,1	1,8

De uma forma geral, por meio das sondagens conduzidas, pode-se perceber que o maciço em estudo consiste em uma camada superficial de aterro como espessura variando entre 1,5 e 5,5m, composto por argila arenosa pouco siltosa, de consistência mole a média e baixos valores de Nspt (variando entre 1 golpe/20cm até 5 golpes/30cm). Abaixo do aterro, nota-se uma camada de areia fina a grossa, pouco siltosa de coloração acinzentada. Deve-se ressaltar que em algumas regiões, esta areia demonstra-se fofa, com valores de Nspt menores que 1 golpe/30cm. Em outros locais, esta mesma camada apresenta valores de Nspt bem superiores, chegando a 12 golpes/30cm. A medida em que se aprofundam as sondagens, estas demonstram camadas, também compostas por solos arenosos, com valores de Nspt crescentes. As figuras seguintes apresentam os perfis geológico-geotécnicos determinados por meio das sondagens conduzidas. A tabela 2 apresenta legenda para caracterização dos materiais.

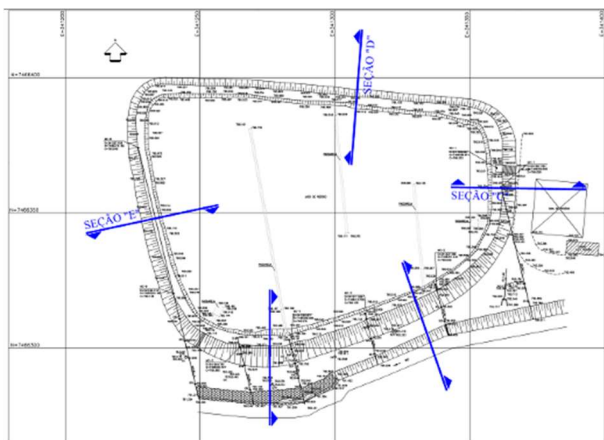


Figura 5. Posionamento das seções em estudo.

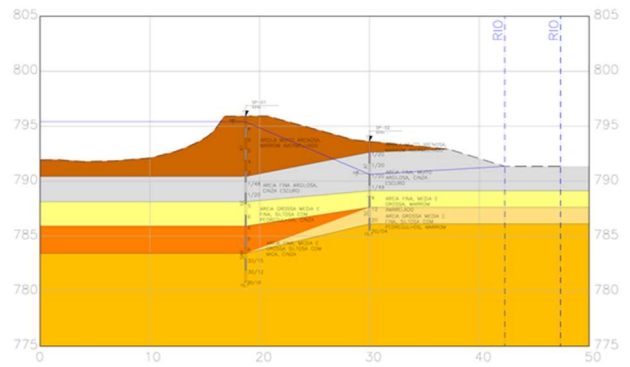


Figura 6. Perfil Seção A (Sondagens SP01 e SP02).

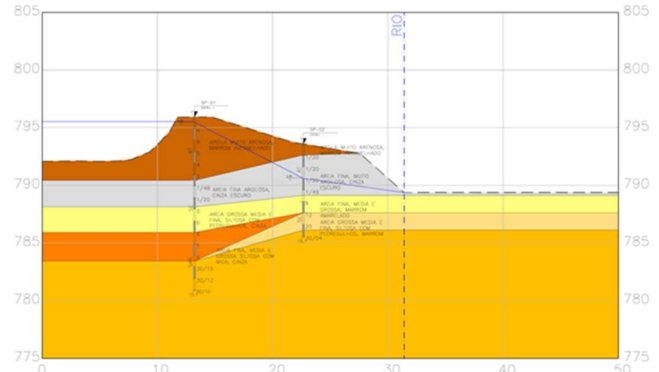


Figura 7. Perfil Seção B (Sondagens SP01 e SP02).

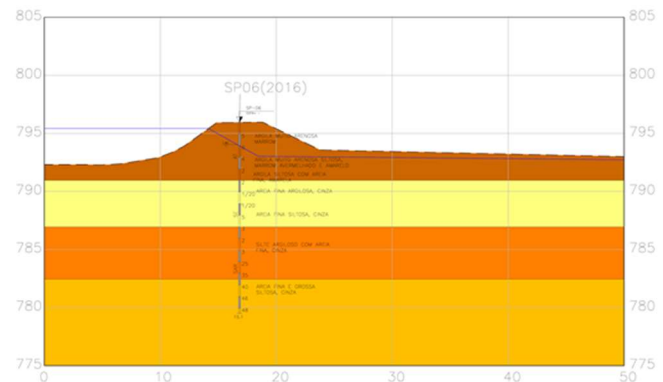


Figura 8. Perfil Seção C (Sondagem SP06).

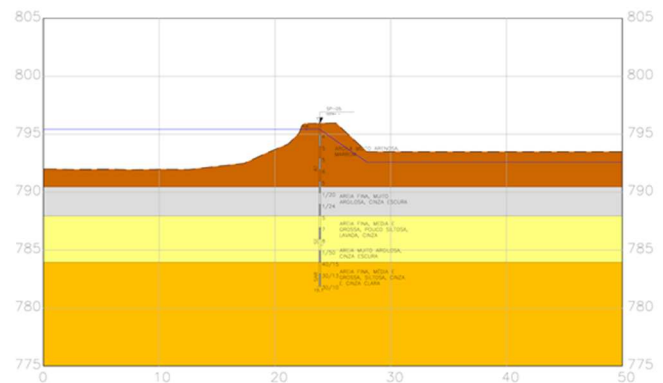







Figura 9. Perfil Seção D (Sondagem SP05).

Tabela 2. Legenda dos materiais representados nos perfis.

Cor	Tipo	Material
	AT	Argila arenosa marrom avermelhada
	SE	Areia fina argilosa cinza escura
	SE	Areia siltosa fina a grossa
	SAR	Areia média a grossa
	SAR	Areia fina marrom com pedregulho
-----	N.A	Nível d'água

Onde: AT-aterro; SE-sedimentar; SAR-Alteração de rocha

3 METODOLOGIA

3.1 Análises de estabilidade conduzidas

As análises de estabilidade foram conduzidas utilizando-se o Método de Bishop Simplificado, o qual assume durante a ruptura o deslocamento de uma massa de solo orientada por uma superfície de ruptura circular.

Após a determinação das superfícies de ruptura críticas para cada seção estudada, os fatores de segurança obtidos foram comparados aos mínimos sugeridos pela norma ABNT NBR 11.682/2009 de maneira a se verificar a adequabilidade destes em relação às especificidades locais.

As análises de estabilidade foram conduzidas utilizando-se o programa computacional Slide 5.0 da RocScience.

O quadro 1 apresenta os requisitos recomendados pela norma para a determinação dos fatores de segurança mínimos aos taludes em estudos, estes são baseados em critérios de segurança contra a perda de vidas humanas e contra a ocorrência de danos ambientais e materiais.

Quadro 1. Fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Nível de segurança contra danos a vidas humanas \ Nível de segurança contra danos ambientais	Nível de segurança		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT NBR 11.682/2009 – “Estabilidade de Encostas”

Dessa forma, por considerar o local com alto potencial de ocorrência de danos ambientais e materiais, uma vez que o dique se localiza em proximidade a um importante rio local; e por também entender que a lagoa consiste em um

local de permanência eventual de pessoas, o fator de segurança mínimo contemplado nas análises foi de **1,4** para ambas as solicitações de estabilidade (reservatório cheio e rebaixamento rápido).

As análises de estabilidade considerando-se o efeito do rebaixamento rápido do reservatório foram realizadas para o talude de montante, uma vez que, segundo CRUZ (1999), este talude é o mais crítico nesta condição.

Destaca-se que, apesar de CRUZ (1999) sugerir a adoção de $FS_{\text{mínimo}}=1,1$ para taludes de montante em condição de rebaixamento rápido, foi utilizado nas análises conduzidas $FS_{\text{mínimo}}=1,4$.

Tal fato justifica-se uma vez que as análises conduzidas tiveram por intuito verificar a estabilidade dos taludes do dique durante um possível esgotamento deste para manutenção, impossibilitando, dessa forma, a dissipação de pressões neutras no interior dos taludes e o ganho de resistência efetiva com o tempo, tal como preconizado por CRUZ (1999) para o caso de barragens de terra (situação esta última que justificaria $FS=1,1$).

3.2 Parâmetros de resistência ao cisalhamento

A adoção dos parâmetros geotécnicos de resistência ao cisalhamento do subsolo local foi fundamentada na análise dos resultados das sondagens a percussão realizadas, classificação tátil-visual dos materiais indicados nos boletins, bem como na bibliografia técnica consultada.

Para a realização das verificações geotécnicas foram considerados horizontes de solo com comportamentos mecânicos distintos. Os parâmetros de resistência e os pesos específicos das camadas são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos utilizados.

Tipo	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	Parâmetro de resistência
AT	18	15	23	Mohr Coumlomb
SE	15	20	-----	Não drenada
SE	18	5	28	Mohr Coumlomb
SAR	20	15	35	Mohr Coumlomb
SAR	20	10	30	Mohr Coumlomb

3.3 Determinação dos coeficientes de permeabilidade

No intuito de se verificar a permeabilidade do aterro do dique e da fundação para realização das análises de estabilidade e determinação da linha freática; foram conduzidos ensaios de permeabilidade a nível constante por infiltração utilizando-se alguns furos de sondagem executados. Os ensaios foram realizados em concordância com as recomendações do Boletim “Ensaio de permeabilidade em solos – orientações para execução em campo” elaborado pela ABGE (2013) (Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental).

3.4 Determinação da linha freática

Por se tratar o objeto de estudos em uma lagoa de decantação, também se procedeu a determinação da análise das condições de fluxo no interior do talude e determinação da linha freática em cada seção. Na região compreendida pela fundação do aterro da lagoa foi considerada condição de equidade entre parâmetros de permeabilidade nas direções horizontal e vertical ($k_v=k_h$). No entanto, no corpo do aterro considerou-se relação $k_v/k_h=0,1$, tal como sugerido por CRUZ (1999). Tal fato se justifica em função da laminação ocorrida durante a compactação de camadas de solo sobrejacentes umas as outras, as quais compõem o maciço, o que acaba influenciando a magnitude dos valores de permeabilidade em ambas as direções ortogonais entre si.

Deve-se salientar que, na situação em estudos, foi considerada saturação do talude de montante da lagoa, mesmo estando este revestido por uma manta de PEAD. A hipótese de saturação do talude de montante é fundamentada pelas inspeções realizadas “in loco”, onde foram constatadas surgências em posições referentes a meia altura dos taludes, bem como problemas na manta.

4 RESULTADOS OBTIDOS

A tabela 4 demonstra os coeficientes de permeabilidade determinados pelos ensaios conduzidos. As figuras 10 a 24 apresentam as análises de estabilidade conduzidas para cada

uma das seções em estudo em ambas as condições de solicitação (reservatório cheio e rebaixamento rápido).

Tabela 4. Parâmetros de permeabilidade obtidos “in situ”.

Tipo	k (cm/s)	k_v/k_h
AT	$1,3 \times 10^{-8}$	0,1
SE	$1,0 \times 10^{-9}$	1,0
SE	$1,5 \times 10^{-7}$	1,0
SAR	$1,0 \times 10^{-7}$	1,0
SAR	$1,0 \times 10^{-7}$	1,0

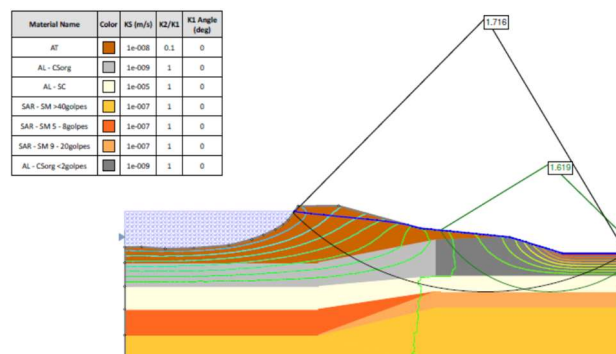


Figura 10. Seção A – Análise de estabilidade talude de jusante reservatório cheio (FS=1,71 e 1,61).

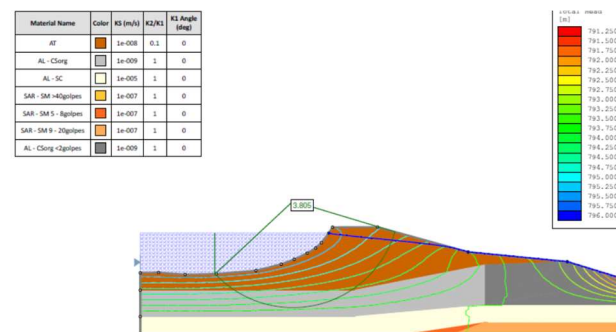


Figura 11. Seção A – Análise de estabilidade talude de montante e reservatório cheio (FS=3,80).

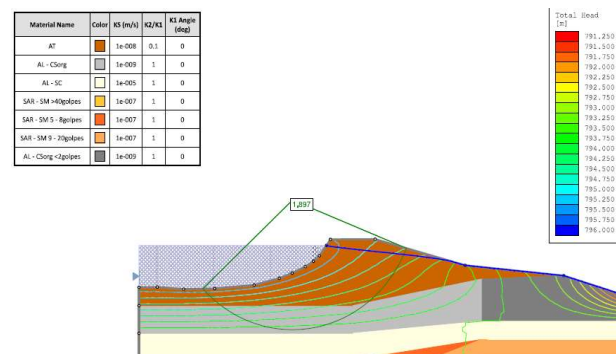


Figura 12. Seção A – Análise de estabilidade talude de montante e rebaixamento rápido do reservatório (FS=1,89).

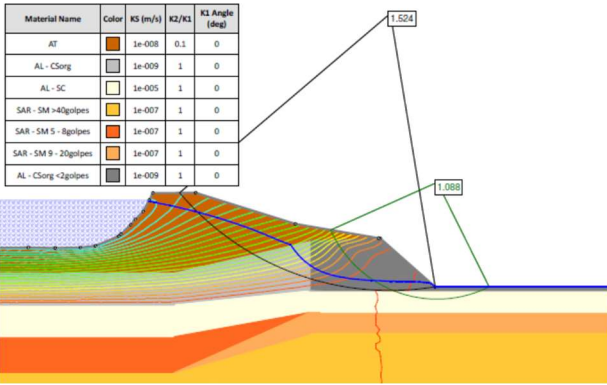


Figura 13. Seção B – Análise de estabilidade talude de jusante e reservatório cheio (FS=1,52 e 1,08).

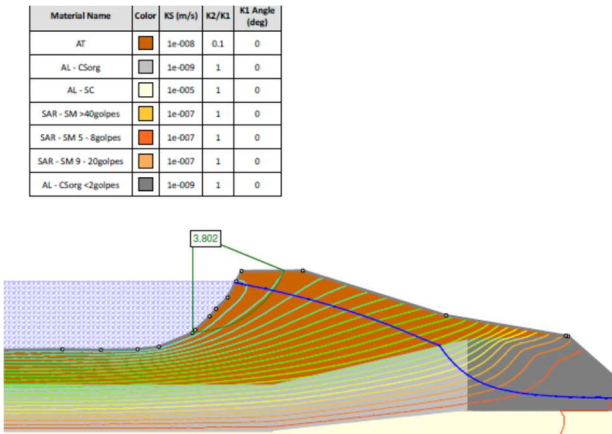


Figura 14. Seção B – Análise de estabilidade talude de montante e reservatório cheio (FS=3,80).

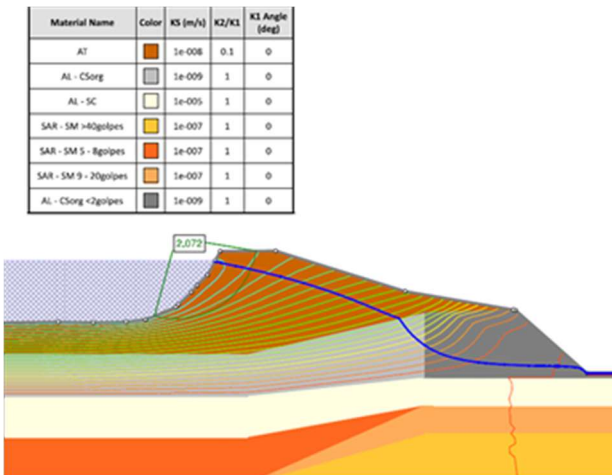


Figura 15. Seção B – Análise de estabilidade talude de montante rebaixamento rápido do reservatório (FS=2,07).

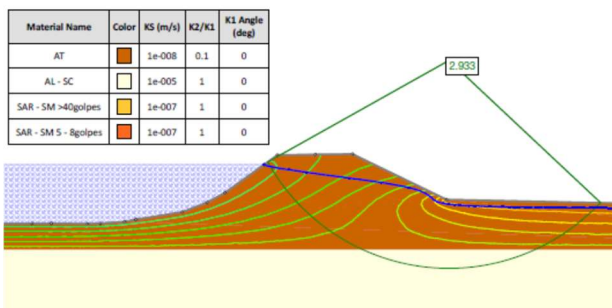


Figura 16. Seção C – Análise de estabilidade talude de jusante e reservatório cheio (FS=2,93).

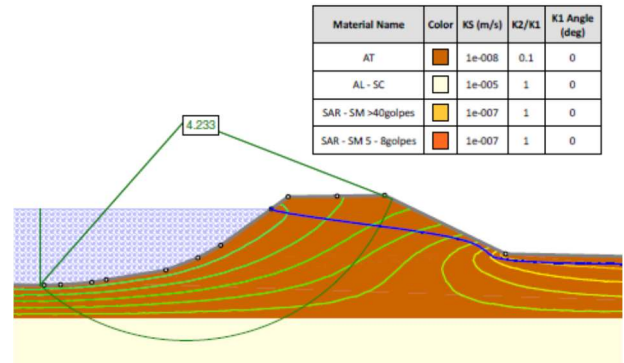


Figura 17. Seção C – Análise de estabilidade talude de montante e reservatório cheio (FS=4,23).

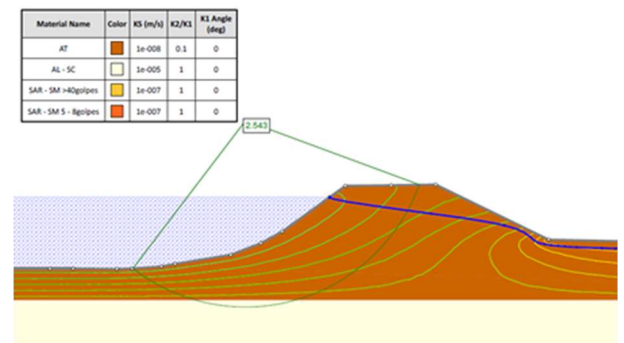


Figura 18. Seção C – Análise de estabilidade talude de montante e rebaixamento rápido do reservatório (FS=2,54).

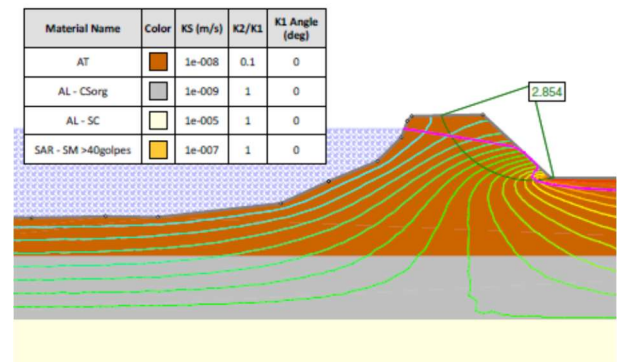


Figura 19. Seção D – Análise de estabilidade talude de jusante e reservatório cheio (FS=2,85).

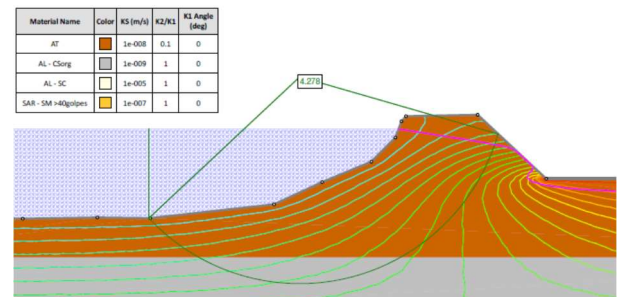


Figura 20. Seção D – Análise de estabilidade talude de montante e reservatório cheio (FS=4,27).

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle (deg)
AT		1e-008	0,1	0
AL - CSorg		1e-009	1	0
AL - SC		1e-005	1	0
SAR - SM >40golpes		1e-007	1	0

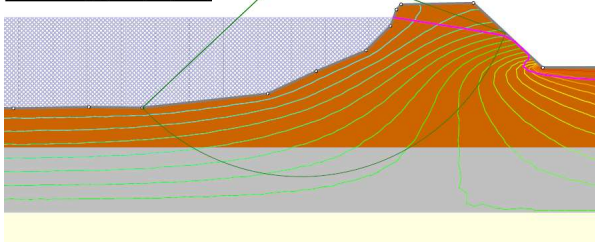


Figura 21. Seção D – Análise de estabilidade talude de montante e rebaixamento rápido do reservatório (FS=2,11).

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle (deg)
AT		1e-008	0,1	0
AL - CSorg		1e-009	1	0
AL - SC		1e-005	1	0
SAR - SM >40golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 5 - 8golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 9 - 20golpes		1e-007	1	0

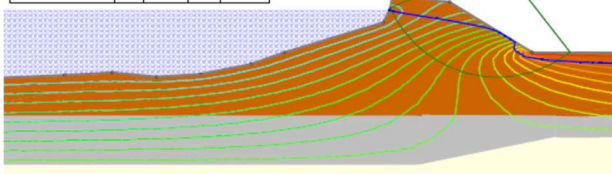


Figura 22. Seção E – Análise de estabilidade talude de jusante e reservatório cheio (FS=3,03).

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle (deg)
AT		1e-008	0,1	0
AL - CSorg		1e-009	1	0
AL - SC		1e-005	1	0
SAR - SM >40golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 5 - 8golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 9 - 20golpes		1e-007	1	0

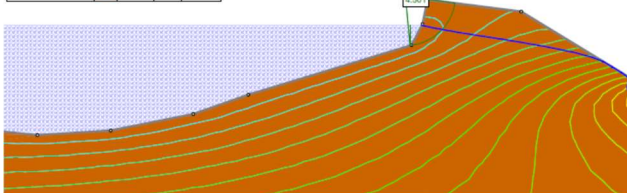


Figura 23. Seção E – Análise de estabilidade talude de montante e reservatório cheio (FS=4,50).

Material Name	Color	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle (deg)
AT		1e-008	0,1	0
AL - CSorg		1e-009	1	0
AL - SC		1e-005	1	0
SAR - SM >40golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 5 - 8golpes		1e-007	1	0
SAR - SM 9 - 20golpes		1e-007	1	0

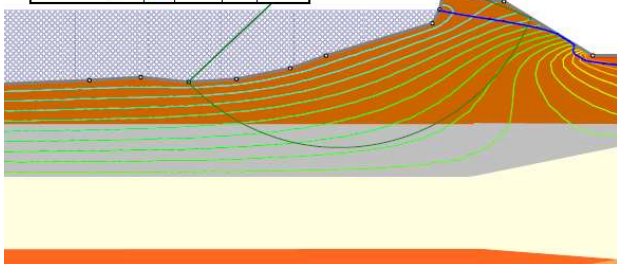


Figura 24. Seção E – Análise de estabilidade talude de montante e rebaixamento rápido do reservatório

(FS=2,45).

A Tabelas 5 e 6 apresentam os fatores de segurança obtidos nas análises conduzidas e as figuras 25 e 26 demonstram comparação entre os valores obtidos.

Tabela 5. Fatores de segurança obtidos – reservatório cheio.

Seção	Talude jusante	Talude montante	Variação (%)	FS mínimo
A	1,71	3,80	55,0	1,4
B	1,52	3,80	60,0	1,4
C	2,93	4,23	30,7	1,4
D	2,85	4,27	33,3	1,4
E	3,03	4,50	32,7	1,4

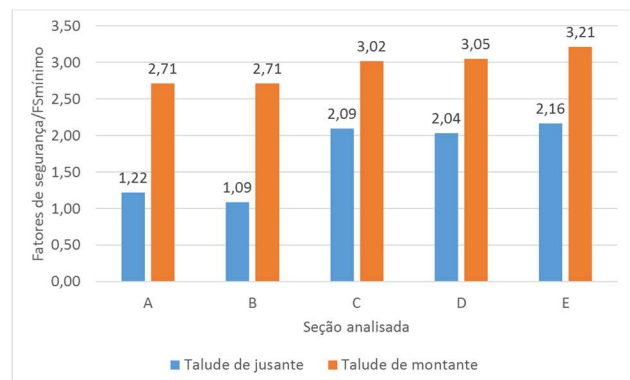


Figura 25. Comparação entre os fatores de segurança obtidos para taludes de jusante e montante com o fator de segurança mínimo a ser obtido ($FS_{obtido}/FS_{mínimo}$).

Por meio da tabela 5 e figura 25 pode-se constatar que os fatores de segurança obtidos para ambos os taludes foram superiores ao mínimo estabelecido pela ABNT NBR 11.682/2009, ou seja, $FS=1,4$. Verifica-se também que os fatores de segurança obtidos para os taludes de montante foram superiores àqueles determinados para os de jusante, apresentando uma variação média de 42,3% ($sd=14\%$, $cv=33\%$). A tabela 6 e a figura 26 apresentam os resultados obtidos para os taludes de montante, tanto para condição de reservatório cheio como rebaixamento rápido.

Tabela 6. Fatores de segurança obtidos para taludes de montante.

Seção	Reserv. cheio	Reserv. vazio	Variação (%)	FSmínimo
A	3,80	1,89	50,3	1,4
B	3,80	2,07	45,5	1,4
C	4,23	2,54	40,0	1,4
D	4,27	2,11	50,6	1,4
E	4,50	2,45	45,6	1,4

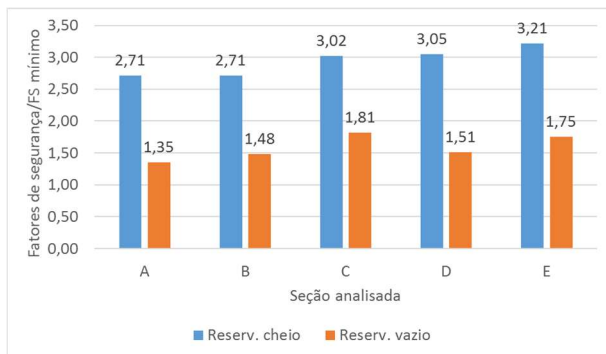


Figura 26. Comparação entre os fatores de segurança obtidos para os taludes de montante nas condições de rebaixamento rápido com o fator de segurança mínimo a ser obtido ($FS_{obtido}/FS_{mínimo}$).

Observa-se por meio da tabela 6 que os fatores de segurança obtidos para os taludes de montante na condição de reservatório cheio foram superiores àqueles determinados para condição de solicitação de rebaixamento rápido. A variação média constatada entre os fatores de segurança, comparando-se ambas as condições foi de 46,4% (sd=4,33% e cv=9,35%).

Na figura 26 se observa uma relação entre os fatores de segurança obtidos e o mínimo adotado neste trabalho ($FS=1,4$). De uma forma geral, pode-se contatar que todas as análises, em ambas as condições estudadas (dique cheio e vazio), conduziram a valores de fator de segurança bem superiores ao mínimo.

5. CONCLUSÕES

As análises de estabilidade conduziram a valores satisfatórios de fatores de segurança em relação ao estabelecido pela ABNT:NBR 11682/2009 considerando-se as especificidades do local.

Ao se comparar, para a condição de dique cheio, os fatores de segurança obtidos para os talude de montante e jusante, constatou-se que os de montante foram os que apresentaram os maiores valores.

Tal fato ocorre, de acordo com PASCHOALIN FILHO e CARVALHO (2014), uma vez que a água percola de montante para jusante, sendo a pressão de percolação favorável à estabilidade do talude de montante e desfavorável à estabilidade do talude de jusante. Ademais, a carga vertical imposta pelo nível d'água da lagoa, em sua cota de enchimento máximo, auxilia na estabilidade do talude de montante.

Em relação as condições de solicitação estudadas, verifica-se que o talude de montante apresenta maiores fatores de segurança ao se considerar o dique cheio. Isso ocorre uma vez que, durante o rebaixamento do nível do reservatório, a carga estabilizante imposta pela água sobre o talude de montante não existe mais, além disso, o talude encontra-se saturado. A velocidade do rebaixamento é superior a velocidade de dissipação das pressões neutras no talude de montante, configurando-se em uma condição de solicitação em termos de tensões totais, uma vez que ocorrem condições não drenadas de resistência.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT:NBR 11.682 – “Estabilidade de encostas”. Rio de Janeiro. 2009.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT:NBR 6484 – “Solo-Sondagens de simples reconhecimento”. Rio de Janeiro. 2001.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. (2013) *Ensaio de permeabilidade em solos: orientações para sua execução em campo*. São Paulo, 80p.
- Cruz, P.T. 100 (1999) *Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projetos*. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 1999. 1ª Edição, 649p.
- Paschoalin Filho, J.A.; Carvalho, D. (2014) Study of seepage and stability of rural dams compacted in three different moisture contents, *Ciência & Engenharia (Science and Engineering)*, Vol. 23, n.2, p11-19.