

ESTABILIDADE PROVISÓRIA DE ESCAVAÇÕES EM SOLOS MOLES COM A UTILIZAÇÃO DE PONTEIRAS A VÁCUO

Isabelle Pipper

Geóloga, G5 Engenharia, Curitiba, PR, Brasil - ipr@g5engenharia.com.br

Milena Arruda Silva

Geóloga Geotécnica, G5 Engenharia, Curitiba, PR, Brasil - mas@g5engenharia.com.br

Paola Dutra

Engenheira Civil Geotécnica, Rumo Logística, Curitiba, PR, Brasil - paola_dutra@outlook.com

Joaquim Duarte

Engenheiro Civil Geotécnico, G5 Engenharia, Curitiba, PR, Brasil - jd@g5engenharia.com.br

RESUMO: Ponteiras a vácuo têm sido amplamente empregadas para o rebaixamento do lençol freático durante o período construtivo em diferentes obras de engenharia. As ponteiras são compostas por uma rede de tubos de PVC instalados em perfurações no terreno, no perímetro da área em que se deseja rebaixar o nível de água no maciço. Este trabalho tem como objetivo apresentar as medidas adotadas para viabilizar a escavação e manter as condições de estabilidade dos taludes do Canal de Fuga de uma Central Geradora Hidrelétrica. O Canal de Fuga do empreendimento é composto por aterro na porção superficial, o qual se sobrepõe a camadas de solo alúvio-residuais com lentes de areia fina a média e/ou areia grossa. Ainda, foi identificada a ocorrência de solos moles compostos por argilas siltosas com areia média, com N_{SPT} entre 0 e 5. As condições de estabilidade das escavações do Canal de Fuga foram analisadas a partir de 3 seções, sendo uma longitudinal ao eixo do canal e duas transversais. Para a determinação dos parâmetros de resistência dos materiais foram executados cinco ensaios de palheta nas camadas de argila com baixa resistência à penetração, em profundidades de 3,0 a 7,0 m. Ensaios de permeabilidade *in situ* foram realizados e estes dados foram considerados nas análises de percolação. Já para os demais materiais do perfil geológico-geotécnico do canal, os parâmetros foram determinados com base nos ensaios de infiltração e/ou perda d'água e resistência à penetração obtidos nas sondagens realizadas no local. O levantamento topobatimétrico do rio e as leituras de instrumentos foram utilizados para a determinação do nível de água, condição de contorno para as análises de percolação. Com base nestes dados, foram realizadas análises para as condições provisória, permanente e de rebaixamento rápido, considerando a aplicação de ponteiras a vácuo durante o período construtivo do Canal de Fuga. A aplicação das ponteiras durante as escavações mostrou-se eficiente e para a estabilização na condição definitiva dos taludes de escavação foi necessária a aplicação de ancoragens passivas, drenos, gabiões tipo caixa e colchão Reno como elementos de estabilização e proteção.

PALAVRAS-CHAVE: Ponteiras à vácuo, Solos moles, Análise de estabilidade, Ensaio de palheta.

ABSTRACT: Vacuum wellpoints have been widely used for dewatering during the construction period in different engineering works. The wellpoints are composed of a network of PVC pipes installed in drillings in the ground, around the perimeter of the area where the ground is intended to be dewatered. This work aims at presenting the measures adopted to enable excavation and to maintain the stability conditions of the slopes of the tailrace channel of a Small Hydropower Plant. The plant's tailrace channel is composed of an embankment, which overlays alluvial-residual soils with lenses of fine to medium sand and/or coarse sand. Soft soils composed of silty clays with medium sand, with SPT values between 0 and 5, were also identified. The stability of the tailrace channel excavations was analyzed on 3 sections, one longitudinal to the channel axis and two transverse. For the determination of the soil's strength parameters, five vane tests were performed in the clay layers with low SPTs, at depths of 3.0 to 7.0 m. In situ permeability tests were performed and their results

were considered in the seepage analyses. For the remaining materials of the geological-geotechnical profile, the parameters were determined based on infiltration and/or water pressure tests and SPT values obtained in the investigations carried out at the site. The topo-bathymetric survey of the riverbed and instrumentation data were used for the determination of the water level, as a boundary condition for the percolation analyses. The stability analyses were carried out for the temporary, permanent, and rapid drawdown conditions, considering the application of vacuum wellpoints during the construction period of the tailrace channel. The application of vacuum wellpoints during the excavations proved to be efficient and for the stabilization of the excavated slopes in the long-term condition, it was necessary to install passive anchors, drains, box and mattress gabions as stability and protection elements.

KEYWORDS: Vacuum wellpoints, Soft soils, Slope stability analysis, Vane test.

1 INTRODUÇÃO

Solos muito moles a moles, com resistência à penetração (N_{SPT}) entre 0 e 5, apresentam baixa resistência e permeabilidade conforme indicado na norma NBR 6484 (2020). Esse tipo de solo apresenta, no geral, problemas associados a recalques devido à sua alta compressibilidade, além de problemas associados à estabilidade devido a sua baixa capacidade de suporte. Existem diversos métodos construtivos que foram desenvolvidos para a instalação de empreendimentos em regiões com a presença de solos moles, entre eles destacam-se a própria substituição do solo mole, aplicação de drenos verticais, bermas de equilíbrio e reforço, além da utilização de ponteiros a vácuo (ALMEIDA, 2010).

Após a identificação da espessura da camada de solo mole na região de interesse por meio de investigações preliminares, como as sondagens a percussão, devem ser realizadas investigações complementares para obtenção dos parâmetros geotécnicos do solo. Tais investigações podem ser realizadas em campo, pelo ensaio de palheta (*vane test*) ou de piezocone, ou em laboratório, pelo ensaio de adensamento oedométrico e triaxial, entre outros.

A Central Geradora Hidrelétrica em questão está localizada no estado de São Paulo, sendo que o dimensionamento do circuito hidráulico de geração considera uma potência instalada mínima de aproximadamente 3 MW. O arranjo do empreendimento compreende uma barragem de terra, canal de adução, tomada de água de baixa pressão, conduto forçado, casa de força e o canal de fuga, sendo que o vertedouro já era uma estrutura existente.

Durante a execução das escavações das estruturas que compõem o arranjo do empreendimento, foram identificadas condições geológico-geotécnicas na região do Canal de Fuga desfavoráveis à estabilidade dos taludes de escavação devido à presença de solos moles. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo apresentar as medidas adotadas para viabilizar a escavação e manter as condições de estabilidade provisória e permanente dos taludes do Canal de Fuga.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

O perfil geológico-geotécnico da região do Canal de Fuga é composto por uma camada de aterro na porção superficial que sobrepõe camadas de solo alúvio-residuais, caracterizados como solos argilosos de cor marrom com presença de entulho, e camadas de argila siltosa e argila arenosa por vezes muito plásticas, de cor cinza, com lentes de areia fina a média e/ou areia grossa (Figura 1).

Também foram identificados, na região do canal, solos moles compostos por argilas siltosas com areia média, com N_{SPT} entre 0 e 5. Os solos moles são caracterizados por apresentar baixa resistência ao cisalhamento e elevada compressibilidade, possuem predominância de partículas argilosas e siltosas, são pouco permeáveis e, eventualmente tipificados por elevados teores de matéria orgânica, responsável pela coloração escura dos solos (PERBONI, 2003).

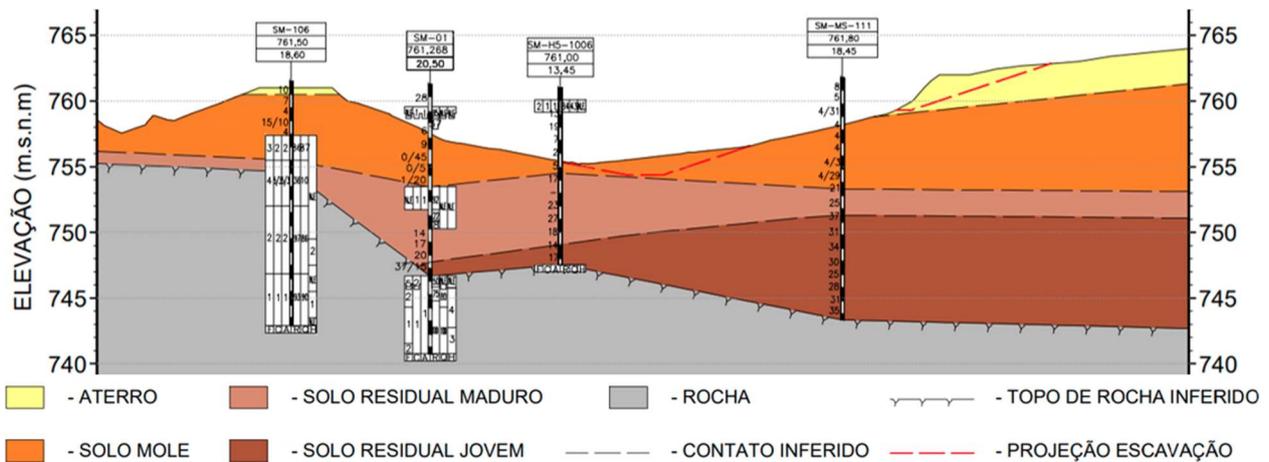


Figura 1. Seção geológico-geotécnica.

3 SEÇÕES E METODOLOGIA DE ANÁLISE

As condições de estabilidade e percolação das escavações do Canal de Fuga foram analisadas a partir de 3 seções, sendo uma longitudinal ao eixo do canal (seção A) e duas transversais (seções B e C, Figura 2), considerando as condições de final de construção (provisória), condição permanente (operação do empreendimento) e rebaixamento rápido (condição excepcional). As análises de estabilidade e de percolação foram realizadas com auxílio computacional do *software Slide2*, da *Rocscience*. Para as análises de estabilidade, considerou-se o solo como um material representado pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

As análises de estabilidade foram efetuadas segundo a teoria do equilíbrio limite adotando-se o método de Spencer, o qual é considerado como um método rigoroso pois considera o equilíbrio de forças e momentos entre as lamelas do terreno, assumindo que a superfície de ruptura apresenta uma configuração geométrica (não-circular). Já nas análises de percolação, empregou-se o método dos elementos finitos (MEF) para a resolução das equações diferenciais do fluxo em meios porosos, de modo a se obter a linha freática, as cargas hidráulicas e poropressões no terreno.

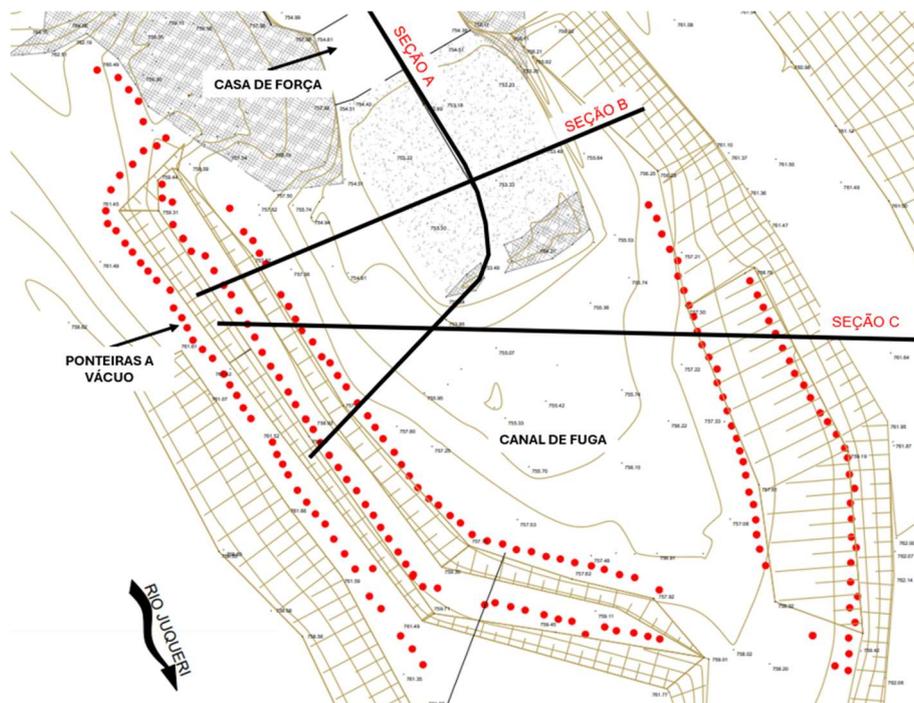


Figura 2. Localização das seções de análise no Canal de Fuga e arranjo das pontes a vácuo.

Os fatores de segurança mínimos considerados nas análises de estabilidade foram definidos com base na norma NBR 11682 (2009). Dessa forma, foi admitido que no presente caso as escavações provisórias demandam um baixo nível de segurança contra danos materiais e ambientais e um médio nível de segurança contra danos a vidas humanas, resultando em um fator de segurança mínimo para esta condição de 1,30. Para a condição permanente da estrutura do canal de fuga considerou-se um alto nível de segurança para ambas as condições, ou seja, fator de segurança mínimo de 1,50. Para a condição excepcional de rebaixamento do nível de água foi adotado um fator de segurança mínimo de 1,10, considerando ser uma condição de baixa probabilidade de ocorrência.

4 PARÂMETROS ADOTADOS

Para a determinação dos parâmetros de resistência dos materiais foram executados cinco ensaios de palheta nas camadas de argila com baixa resistência à penetração (solo mole), em profundidades de 3,0 a 7,0 m. A resistência não drenada do solo mole foi definida com base em um dos menores valores obtidos para a condição indeformada nos ensaios de palheta, sendo este 39% menor do que a média dos valores obtidos nos ensaios.

Já para os demais materiais do perfil geológico-geotécnico do canal, os parâmetros foram determinados com base na resistência à penetração, além do embasamento nos dados da literatura. Para o coeficiente de permeabilidade dos solos, foram realizados ensaios *in situ* nos furos de sondagem do canal de fuga. O ensaio de permeabilidade *in situ* foi realizado a cada metro do furo, sendo obtidos valores de permeabilidade para cada uma das camadas identificadas no perfil estratigráfico. Os resultados indicaram coeficientes de permeabilidade próximos para as camadas, na ordem de 10^{-5} cm/s. No geral, os solos foram classificados como argila pouco arenosa, argila siltosa, silte argiloso a silte arenoso. Conforme apresentado por Pinto (2006), os valores típicos de permeabilidade para esses materiais, segundo a sua granulometria, está coerente com os valores obtidos nos ensaios de campo. A Tabela 1 resume os parâmetros adotados nas análises.

Com relação aos níveis de água, estes foram obtidos por meio de análises de percolação, em que as condições de contorno foram baseadas em diferentes informações para a direita e esquerda hidráulica do canal. Para a direita hidráulica foram consideradas as informações obtidas do levantamento topobatimétrico executado em 2022, no qual foi indicado o nível de água no rio aproximadamente na El. 758,70 m. Para a esquerda hidráulica, foi adotado o nível de água indicado pelo medidor de nível de água instalado nesta região, denominado de MNA-108. Entre fevereiro de 2022 e janeiro de 2023 este medidor de nível de água apresentou leituras constantes aproximadamente na El. 756,00 m, a qual foi adotada nas análises de estabilidade.

Tabela 1. Parâmetros adotados.

Identificação		Descrição	Parâmetros			
			γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	k (m/s)
Solo Alúvio-Coluvionar	SAC	Argila pouco arenosa (fina a grossa), com silte, com pedregulho (provável material de bota-fora)	18	5	24	1,0E-07
Solo Mole	SM	Argila siltosa / Argila pouco arenosa, com NSPT menor ou igual a 4	15	$S_u = 23$ kPa		6,0E-07
Solo Residual Maduro	SRM	Silte argiloso, com estrutura reliquiar pouco preservada, cinza amarelado	18	12	26	1,0E-06
Solo Residual Jovem	SRJ	Silte arenoso, pouco argiloso, com estrutura reliquiar preservada, cinza amarelado	19	16	30	1,0E-07
Rocha	R	Rocha sã	25	<i>Infinite Strength</i>		5,0E-07

Dessa forma, os seguintes cenários foram considerados para avaliação da estabilidade dos taludes do Canal de Fuga:

- Condição Provisória: análise considerando o cenário de final de construção, com o término da escavação comum do canal de fuga, nível de água no rio na direita hidráulica (El. 758,70 m) e nível de água indicado pelo MNA-108 na esquerda hidráulica (El. 756,00 m);
- Condição Permanente: análise considerando o cenário de operação do empreendimento, com nível de água no canal na El. 759,40 m;
- Condição de Rebaixamento Rápido: análise que considera o rebaixamento do nível de água do canal de fuga sem a dissipação total do excesso de poropressão no maciço.

5 TRATAMENTOS APLICADOS

Para atender aos fatores de segurança mínimos requeridos nos cenários avaliados foi considerada a aplicação de diferentes tratamentos geotécnicos nos taludes de escavação do Canal de Fuga, os quais são descritos a seguir. Para a condição provisória, foco deste estudo, foi indicada a aplicação de ponteiros a vácuo de forma a obter-se o fator de segurança mínimo requerido pela norma ($FS = 1,30$).

5.1 Ponteiros a vácuo

As ponteiros, também denominadas de ponteiros filtrantes, são compostas por uma rede de tubos de PVC instalados em perfurações verticais no terreno, no perímetro da área em que se quer rebaixar o lençol (ALONSO, 1999). A rede de ponteiros é ligada a um sistema de bombeamento constituído de duas ou mais bombas a depender do tamanho do conjunto, conforme apresentado na Figura 3. O sistema é provisório, ou seja, o rebaixamento do nível de água é realizado por um período determinado, no presente caso durante a execução das escavações. Após a desativação do sistema, o lençol freático retorna ao seu nível natural.

Dessa forma, a utilização das ponteiros a vácuo foi prevista para a execução das escavações do Canal de Fuga, totalizando 192 ponteiros com espaçamento de 1,0 m e comprimento de 3,0 m de cada ponteira, conforme arranjo apresentado na Figura 2, de modo a garantir a estabilidade provisória dos taludes de escavação, antes da execução dos tratamentos e aplicação dos revestimentos.

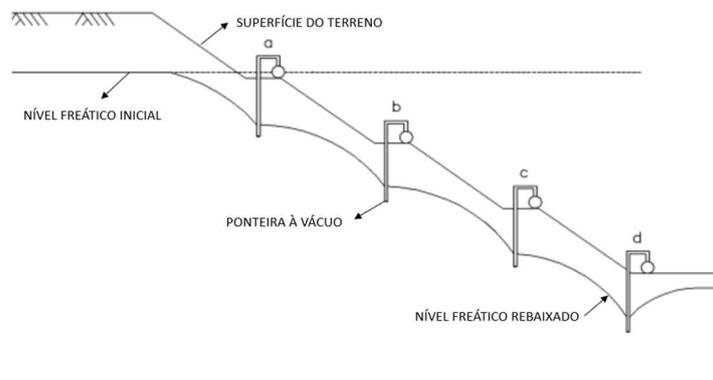


Figura 3. Seção esquemática com a distribuição da instalação de ponteiros a vácuo (Adaptado de ALONSO, 1999).

5.2 Tratamentos adicionais

Com o objetivo de aumentar a sobrecarga na porção inferior dos taludes e, conseqüentemente, aumentar o fator de segurança, foi considerada a execução de gabiões tipo caixa com espessura de 0,50 m em todo o fundo do Canal de Fuga. Além disso, até o topo do canal foi considerada a aplicação de gabiões tipo colchão Reno com espessura de 0,17 m, composto por material drenante com um peso inferior ao gabião caixa, sendo um elemento de proteção dos taludes para condição de operação normal e eventual necessidade de esvaziamento.

Para a estabilidade da Seção B, na condição permanente, também foram adotadas ancoragens passivas caracterizadas por barras de aço CA-50 com diâmetro nominal de 25 mm e comprimento de 3,00 m.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira análise realizada para a verificação da estabilidade da escavação do Canal de Fuga, considerou as condições de nível da água com base nos boletins das sondagens executadas no empreendimento sem a atuação das ponteiros a vácuo.

Para a Seção A (longitudinal) na condição de final de construção o Fator de Segurança obtido foi de 2,57. Nas análises transversais, seção B e C, os Fatores de Segurança obtidos não atenderam ao mínimo requerido, resultando em 1,25 para a Seção B, 1,10 para a Seção C na esquerda hidráulica (Figura 4) e 1,36 para a direita hidráulica da Seção C.

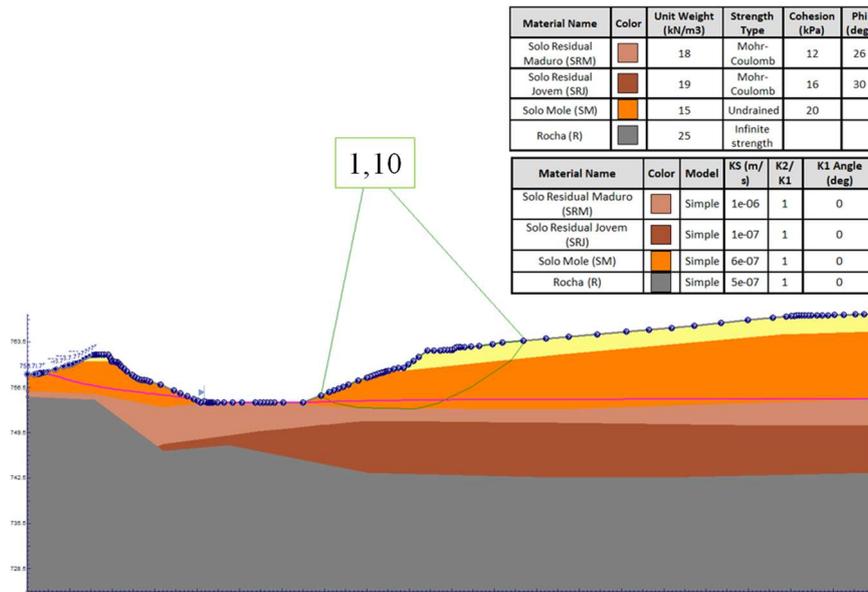


Figura 4. Seção C – Esquerda Hidráulica (EH), sem ponteiros a vácuo.

Dessa forma, para que o Fator de Segurança mínimo fosse obtido durante a fase de escavação, foi considerada a aplicação de ponteiros a vácuo para o rebaixamento do nível da água em aproximadamente 3,00 m. Com a aplicação desse tratamento, o Fator de Segurança passou para 2,72 na Seção A (Figura 5), 1,42 para a Seção B (Figura 6) e na Seção C resultou em 1,83 e 1,39, na direita e esquerda hidráulica, respectivamente, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8. Sendo assim, o Fator de Segurança mínimo foi atendido para a condição de final de construção.

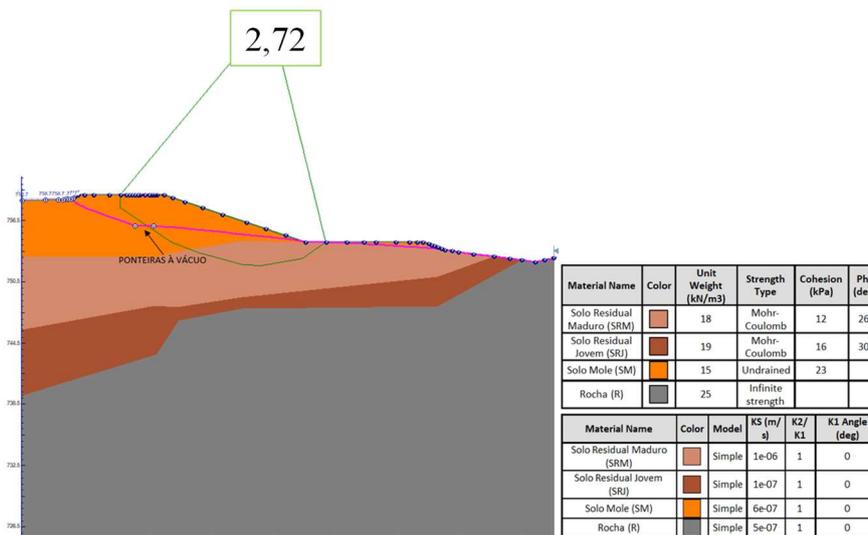


Figura 5. Seção A – Com ponteiros a vácuo.

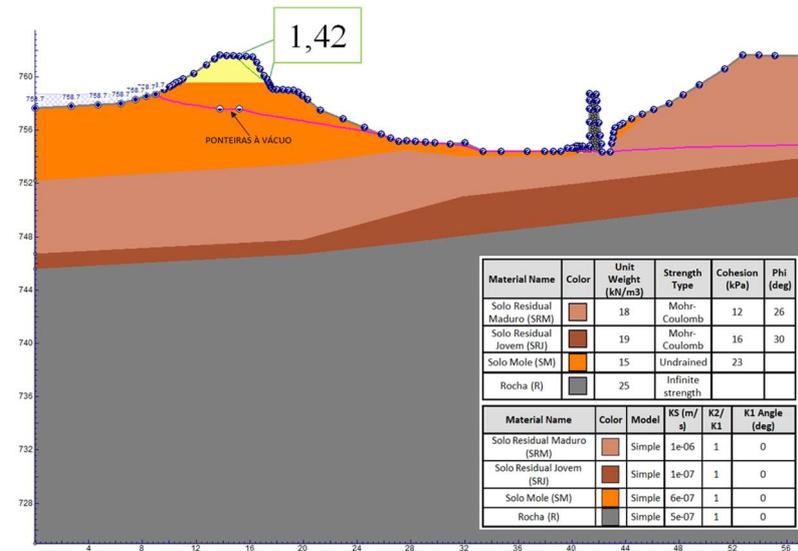


Figura 6. Seção B – Com ponteiros a vácuo.

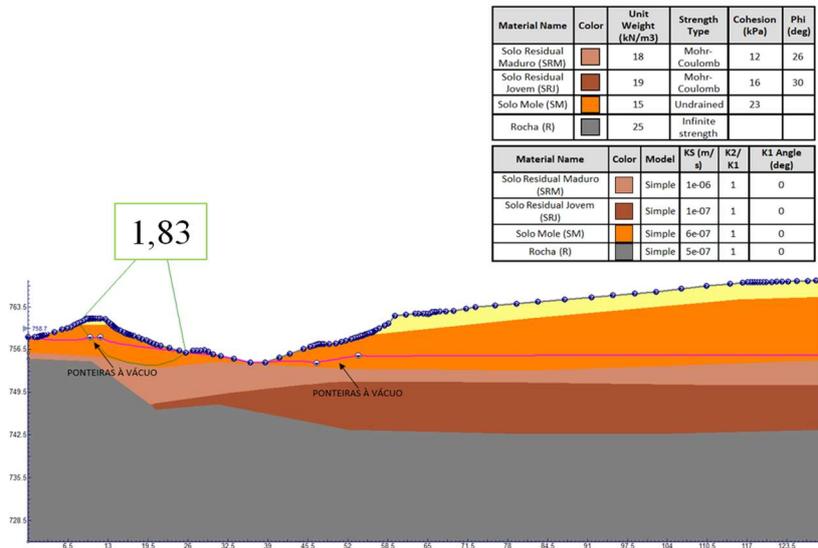


Figura 7. Seção C – Com ponteiros a vácuo – Direita Hidráulica (DH).

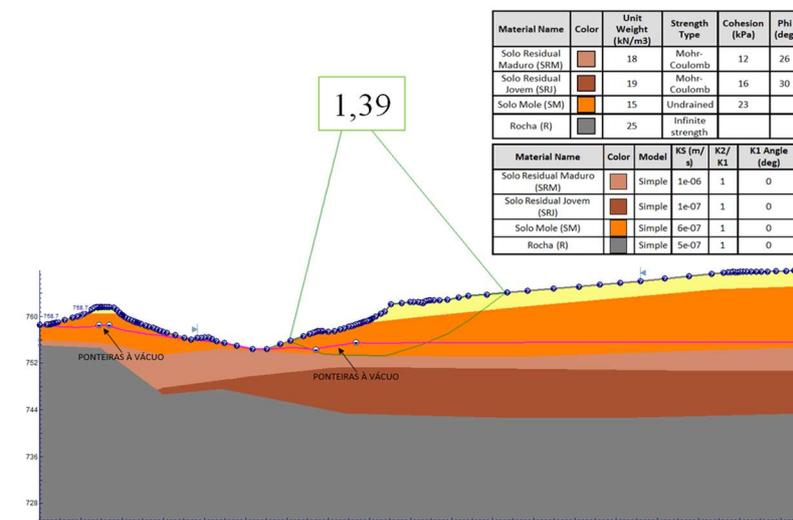


Figura 8. Seção C – Com ponteiros a vácuo – Esquerda Hidráulica (EH).

Para a proteção dos taludes na condição permanente, foram aplicados tratamentos geotécnicos conforme apresentado no item 5. Com isso, o Fator de segurança da Seção A resultou em 5,97. Para a seção B, além do tratamento com material granular (gabião e colchão Reno), também foi considerada a utilização de barras de ancoragem, atingindo um Fator de Segurança de 1,53. Por fim, na Seção C os Fatores de Segurança passaram para 2,72 e 1,66, para a direita e esquerda hidráulica, respectivamente. Para a condição de rebaixamento rápido todos os fatores de segurança ficaram acima de 1,10. A Tabela 2 apresenta um resumo dos fatores de segurança.

Tabela 2. Resumo dos fatores de segurança obtidos nas análises.

Condição	Seção	Fator de Segurança
Final de construção (com ponteiros a vácuo)	A	2,72
	B	1,42
	C - DH	1,83
	C - EH	1,39
Permanente	A	5,97
	B	1,53
	C - DH	2,72
	C - EH	1,66
Rebaixamento rápido	A	2,59
	B	1,52
	C - DH	1,37
	C - EH	1,93

7 CONCLUSÕES

A partir das análises de estabilidade do Canal de Fuga, conclui-se que a utilização das ponteiros a vácuo a fim de proporcionar o rebaixamento do nível da água freática durante as escavações dessa estrutura apresentou uma boa efetividade, uma vez que permitiu o aumento do Fator de Segurança para o mínimo requerido na condição provisória segundo a norma ($FS = 1,30$). Com isso, o Fator de Segurança passou de 2,57 para 2,72 na Seção A. Na Seção B o FS passou de 1,25 para 1,42 e para a seção C de 1,36 para 1,83 (direita hidráulica) e de 1,10 para 1,39 na Seção C (esquerda hidráulica).

Tal fato foi evidenciado durante a execução das escavações em campo, pois não foram observados indícios de instabilidade dos taludes de escavação durante a obra. Para a condição permanente, assim como para a condição de rebaixamento rápido, o fator de segurança mínimo foi garantido aplicando-se diferentes tratamentos geotécnicos, como gabiões tipo caixa e colchão Reno, além de ancoragens passivas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a G5 Engenharia pela disponibilização das informações utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 6484. *Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Almeida, M. de S. S. (2010) *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Alonso, U. R. (1999) *Rebaixamento Temporário de Aquíferos*, 2ª Ed., Oficina de Textos. São Paulo, 152 p.
- Pinto, C. de S. (2006) *Curso básico de Mecânica dos Solos*, 3ª Ed., Oficina de Textos. São Paulo, 368 p.
- Perboni, J. P. (2003) *Análise de estabilidade e de compressibilidade de aterros sobre solos moles-caso dos aterros de encontro da ponte sobre o Rio dos Peixes (BR 381)*. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto.