

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/781

Determinação de parâmetros do material para análise de estabilidade de taludes de um canal de desvio

Jaime Mesquita de Souza

Geólogo Geotécnico Sênior, Hatch Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, jaime.souza@hatch.com

Carlos Concha

Engenheiro Geotécnico Intermediário, Hatch Engenharia, Niagara Falls, Canadá, carlos.concha@hatch.com

Linda Lau

Engenheira Geotécnica Sênior, Hatch Engenharia, Mississauga, Canadá, linda.lau@hatch.com

RESUMO: Para mitigar os riscos na área destinada a deposição de rejeito filtrado será necessário coletar o escoamento de uma bacia através de um canal projetado ao redor do depósito. As seções transversais do projeto mostram taludes superiores a 25 m de altura, compostos por solo e rocha, tornando-se necessária a realização de uma análise de estabilidade ao longo do canal de desvio, visando garantir que o canal cumpra as premissas do projeto. O objetivo desse artigo é apresentar os desafios em definir parâmetros de resistência geotécnica numa sequência granítica intemperizada e garantir a estabilidade dos cortes numa região sísmicamente ativa. A geologia local apresenta rochas ígneas intrusivas de natureza granítica, granodiorítica e ligeiramente diorítica. As informações sobre as características geomecânicas do maciço são oriundas de investigações geotécnicas, geofísicas e levantamento de campo, para obtenção de medidas estruturais ao longo dos mais de 3 km do canal projetado. Fundamentado no RQD e no grau de alteração, foi possível diferenciar no perfil de intemperismo a parte do maciço que representava rocha, da parte representada por solo. O eixo do canal foi compartimentado conforme as suas mudanças de direção e cada seguimento foi representado por um conjunto de medidas estruturais, para posteriormente determinar os processos instabilizadores. Por fim, os parâmetros geomecânicos encontrados estavam compatíveis com as características do maciço e as análises de estabilidade apresentaram fatores de segurança mínimos superiores ao determinado em projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Talude Rochoso, Parâmetros Resistência, Fator de Segurança, Canal, Carregamento Sísmico.

ABSTRACT: To mitigate risks in the area intended for depositing filtered waste, it will be necessary to collect runoff from a basin through a channel designed around the deposit. The cross-sections of the project show slopes exceeding 25 m in height, composed of soil and rock, making it necessary to carry out a stability analysis along the diversion channel. The objective of this article is to present the challenges in defining geotechnical resistance parameters in a weathered granite sequence and ensuring the stability of cuts in a seismically active region. The local geology presents intrusive igneous rocks of a granitic, granodioritic and slightly dioritic nature. Information on the geomechanical characteristics of the stratigraphy comes from geotechnical and geophysical investigations and field surveys, to obtain structural measurements along more than 3 km of the designed channel. Based on the RQD and the degree of weathering, it was possible to differentiate in the weathering profile rock from soil. The channel axis was compartmentalized according to its changes in direction and each segment was represented by a set of structural measures, to later determine the destabilizing processes. Finally, the geomechanical parameters found were compatible with the characteristics of the massif and the stability analysis showed minimum factor of safety values higher than those required by the project.

KEYWORDS: Rock Slope, Resistance Parameters, Safety Factor, Channel, Seismic Loading.

1 INTRODUÇÃO

Uma mineradora possui e opera um complexo de mineração de minério de ferro dentro de uma planta de beneficiamento nominal anual de 16 milhões de toneladas. Atualmente, o rejeito gerado pelo beneficiamento do minério é armazenado numa barragem. Com o objetivo de substituir o método de armazenamento desse rejeito, a mineradora contratou um estudo de engenharia detalhado para elaboração do projeto de empilhamento de rejeito filtrado numa área de 138 ha, com volume de estocagem estimado em 54 milhões de m³. O desenvolvimento da área de armazenamento desse rejeito exigirá o desvio de um córrego para coletar o escoamento da bacia hidrográfica e ser transportado através do entorno desta pilha. Os estudos hidráulicos indicaram a necessidade de desenvolvimento de um amplo canal, com taludes escavados em rocha e solo, alcançando cerca de 30 metros de altura. Para obter informações visando compreender as condições da fundação do canal de desvio, a projetista elaborou um extenso programa de investigação geotécnica e geofísica da área, além de um programa de ensaios laboratoriais específico para a região de fundação do canal de desvio. O estudo geotécnico do canal incluiu a realização de dezoito sondagens mistas e testes carga pontual. Além disso, foi conduzido um levantamento geofísico utilizando dois métodos sísmicos: o método MASW (Análise Multicanal de Ondas de Superfície), com quarenta e oito (48) pontos distribuídos em sete perfis ao longo e perpendicularmente ao alinhamento do canal, e o método de Refração Sísmica, que abrangeu dezesseis (17) perfis ao longo e perpendicularmente ao alinhamento do canal. Durante a análise dos dados ficou evidente a dificuldade na determinação do fator de segurança a partir de um talude misto, diante das incertezas provenientes do contato entre solo e a rocha e dos parâmetros geotécnicos de resistência a serem utilizados para a análise de estabilidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Levantamento de campo e tabulação de dados

Os dados estruturais das discontinuidades, do local onde será escavado o canal de desvio e nos seus arredores, foram obtidos em duas campanhas de levantamento de campo alcançando 35 medidas estruturais complementares, somando-se as 59 já obtidas no primeiro levantamento de campo, perfazendo um conjunto de atitudes que cobriram os trechos então com poucas ou nenhuma medida. A avaliação das medidas estruturais foi realizada através do programa Dips 2022 versão 8.018 da *Rocscience*. Em complementação a organização de dados e análise das famílias de discontinuidades, a utilização do Dips permitiu que fossem analisados os processos instabilizadores e as suas respectivas probabilidades de ocorrência.

2.2 Compartimentação do eixo do canal de desvio

O projeto de construção do canal de desvio envolve cortes em distintas direções de alinhamento ao longo de mais de 3 km, perfazendo 27 segmentos, que em algumas áreas de corte, alcança-se profundidades onde rocha de filiação granítica serão expostas. Inicialmente, foram distribuídas as medidas estruturais ao longo do eixo compartimentando de modo que cada segmento tivesse representado por ao menos uma medida estrutural, ou seja, uma atitude. Posteriormente, foi executada uma análise cinemática, levando em consideração três diferentes inclinações de corte do talude, para a sua conformação final. Assim, com o objetivo de investigar como o ângulo de inclinação influencia os fatores de segurança nos distintos tipos de processos de instabilização. Para analisar o percentual crítico de ocorrência de diferentes processos instabilizadores, foi realizada uma análise de sensibilidade variando a inclinação do talude do canal projetado (1H:1V, 1.5H:1V e 2H:1V) e cruzando com os diferentes ângulos de mergulho das discontinuidades de cada um dos trechos. Na figura 1 é apresentado o percentual crítico de diferentes tipos de falhas para os 27 segmentos, sendo que a falha do tipo tombamento oblíquo possui o maior percentual crítico, variando entre 15% e 20%, enquanto a falha tombamento flexural varia entre 10% e 15%. O deslizamento em cunha é o que apresenta o menor percentual de ocorrência.

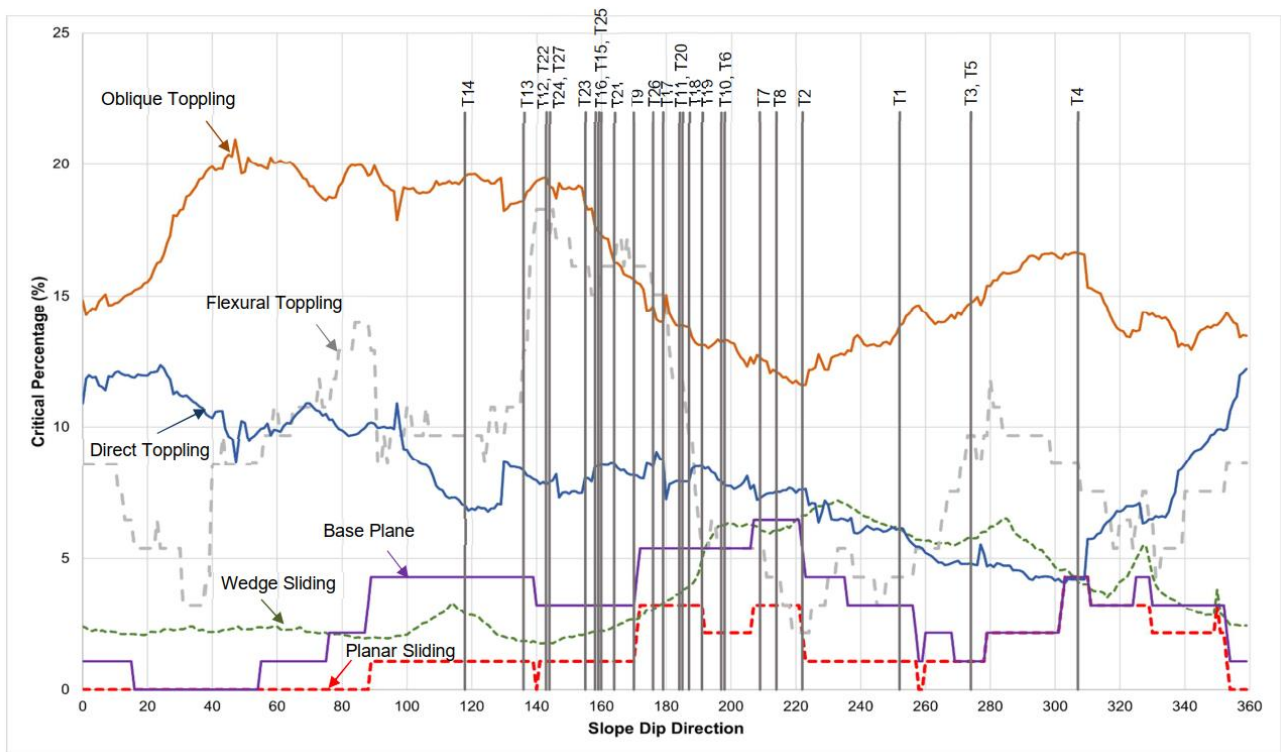


Figura 1. Distribuição dos processos instabilizadores nos segmentos do canal.

Na tabela 1 são apresentados os segmentos mais críticos, onde há proximidade de afloramentos rochosos e maior altura de corte, juntamente com suas respectivas probabilidades de falha.

Tabela 1. Probabilidade de falhas de segmentos mais críticos.

Trecho	Altura da inclinação de corte (m)	Deslizamento Planar	Porcentagem de Probabilidade de Falha			
			Deslizamento da Cunha (%)	Tombamento Flexural (%)	Tombamento Direto (%)	Tombamento Obliquo (%)
1	6	0	14	0	5	6
25	9.6	0	0	33	0	33
26	10.4	0	0	25	0	17
27	30.5	0	0	50	17	17

3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA

3.1 Avaliação Geológica, estrutural e dos materiais

3.1.1 Geologia regional

O projeto do canal de desvio está localizado na porção oeste da província fisiográfica da Sierra Madre del Sur e na subprovíncia das Sierras de La Costa de Jalisco e Colima. O contexto geológico regional é marcado por uma tectônica tangencial, que envolve uma margem continental ativa e a evolução de uma área vulcânica em arco. Um processo dinâmico associa e distorce a série de sedimentos vulcânicos composta por andesitos, tufos andesíticos, aglomerados andesíticos, pórfiros andesíticos, arenitos, folhelhos, calcários e alguns corpos microcristalinos em forma de soleiras. Nesse contexto, também hospeda rochas ígneas de caráter intrusivo e composição granítica, variando do granito ao granodiorito, que varia ligeiramente em algumas áreas para diorito das quais cobrem toda a área de implantação do canal.

3.1.2 Geologia local

As unidades litológicas que representam a estratigrafia local da área de estudo são constituídas por rochas do Cretáceo Superior na base e correspondem a rochas ígneas, de composição granítica e granodiorítica intrudidas nas rochas pré-existentes. O Quaternário é representado por depósitos aluviais resultantes do intemperismo das rochas mais antigas, encontradas em rios e córregos que as transportaram como blocos, cascalho, areia e argila. A região de implantação do canal apresenta localmente afloramentos de rochas ígneas intrusivas de natureza granítica ou granodiorítica a composição ligeiramente diorítica em certas áreas. Os levantamentos geológicos em campo realizados ao longo do alinhamento do canal mostraram a presença de perfis saprolíticos de origem granítica e granitos intemperizados de coloração variável do bege com tons amarelos ao cinza-claro. Microscopicamente os minerais se apresentam subédricos a anédricos, faneríticos, composto por fenocristais de feldspato potássico, quartzo e plagioclásio.

A erosão progressiva na área expôs a unidade granítica na superfície que, por sua vez exposta foram submetidos aos esforços de distensão, para posteriormente serem erodidos. O processo intempérico alterou parte dos seus minerais primários resultando em argilosominerais, indicando assim um grau de Intemperismo III-IV na escala ISRM, o que significa que o maciço rochoso está decomposto em 80% na área. Durante o levantamento de campo ficou clara a divisão do canal baseado a natureza das rochas. O primeiro setor possui como característica principal a grande presença de blocos, envoltos numa matriz argilosa. O segundo setor, onde são encontrados poucos blocos e quando visualizados, estão presentes nas linhas de drenagem ou próximos a estas, sobre solo de matriz arenosa.

3.1.3 Geologia estrutural do maciço

Os planos de descontinuidades medidas na área são onipresentes e os mergulhos tendem a ser vertical. O tipo de descontinuidade medida ficou dividido em falhas, foliações e fraturas, principalmente, como também a ocorrência de diques dioríticos, em número de 2. A interpretação estrutural da área de estudo definiu, com o auxílio de estereogramas realizados no *software* Dips v7.016, um conjunto de 3 famílias principais; família 1, descontinuidades (fraturas) que tem atitude média 131/89, família 2, secundária, com atitude 251/75 e uma terceira família com atitude 18/79.

3.2 Definição dos materiais

Foram classificados cinco materiais distribuídos no perfil de intemperismo que compõe a fundação de acordo com a investigação de campo e descrições laboratoriais. A tarefa crítica foi definir o limite do saprolito, pois essa sequência pode se estender a profundidades de até 50 m, com alternância de materiais de diferentes resistências. A determinação do contato entre o material rochoso e o solo, dentro de um mesmo perfil contido na seção de análise de estabilidade configurou-se numa das dificuldades para determinação de uma geometria assertiva, principalmente na altura do talude a ser analisado. A tabela 2 foi resultado da tabulação dos dados obtidos quando descritos os boletins de sondagem. A categorização informada na coluna “Material” foi determinada a partir da experiência da equipe de projeto como também dos dados obtidos no levantamento de campo. O desafio de determinar que parte do maciço seria tratada como solo e a parte que seria determinada como rocha é crucial para avaliação da estabilidade. Para determinação do modelo para solo era importante determinar o *bedrock* e as suas características anisotrópicas que podem influenciar diretamente na determinação do fator de segurança, numa primeira análise, se a superfície de ruptura poderia eventualmente penetrar no *bedrock* e sua anisotropia exercer uma influência decisiva na análise. Na situação da parte do maciço, onde serão tratados os processos instabilizadores em rocha, quais seriam suas características mínimas para determinar o contato com o material “solo”. Assim, a equipe envolvida nas análises de estabilidade determinou, com base fundamentalmente no RQD, grau de intemperização e grau de resistência, que os maciços classificados como I, II e III, segundo o seu RMR, seriam tratados como rocha. A

parte do perfil de intemperismo, cuja classificação RMR remetesse a uma classe de maciço IV e V, com RQD inferior a 15, grau de intemperização W5 e W6, grau de resistência R0 a R1 e durante a execução da sondagem a percussão fosse obtido o valor “n” devem ser tratados como solo.

Tabela 2. Critérios para classificação de material da fundação do canal.

Material	Descrição	RMR	RQD	Grau de Intemperização	Grau de Resistência	SPT (N)
Solo residual A	>50% de finos	N/A	N/A	W6	R0	0 – 14
Solo residual B	>50% de areia e pedregulhos	N/A	N/A	W6	R0	14 – 25
Rocha completamente intemperizada	Transição da rocha para solo. 10 – 90% de fragmentos	IV-V	0 - 15	W5	R0 – R1	25 – R
Rocha intemperizada	Parcialmente intemperizado	III	15 - 50	W3 – W4	R2 – R4	R
Rocha não intemperizada	Ligeiramente intemperizada, rocha fresca	I,II,III	50 - 100	W1 – W3	R3 – R6	R

A rocha intemperizada está subjacente a rocha completamente intemperizada e é considerado rocha quando alcança valores de RQD de pelo menos 15%. O granito intemperizado é geralmente descrito como rocha parcialmente intemperizada com grau de intemperismo de W3 a W4. A profundidade do granito intemperizado varia de 1,35 m a 50,4 m. A velocidade interpretada da onda de cisalhamento pode atingir até 1281 m/s. Foi considerado leito rochoso de granodiorito onde o valor de RQD é superior a 50% com baixo grau de intemperismo, variando de W1 a W3 e alta resistência de R3 a R6. A profundidade do leito rochoso varia de 14,3 m a 50,4 m. Os testes de carga pontual revelaram que para o granito totalmente intemperizado e intemperizado, em média, apresentaram 4,7 e 9,8 MPa. Para o granito não intemperizado o teste revelou uma resistência média de 51,7 MPa.



Figura 2. Testemunhos de sondagem: (a) Solo residual, (b) Rocha completamente intemperizada, (c) Rocha intemperizada e (d) Rocha não intemperizada.

Com a determinação dos materiais que compõem o perfil deve-se determinar os parâmetros geotécnicos para realização das análises de estabilidade. É importante destacar que nessa fase do projeto não foram previstos ensaios em rocha complementares. Assim, as estimativas foram necessárias para estabelecer os *inputs* provenientes de algumas correlações como de Hoek & Brown (1997) para determinação do ângulo de atrito interno e do valor do intercepto de coesão (figura 3).

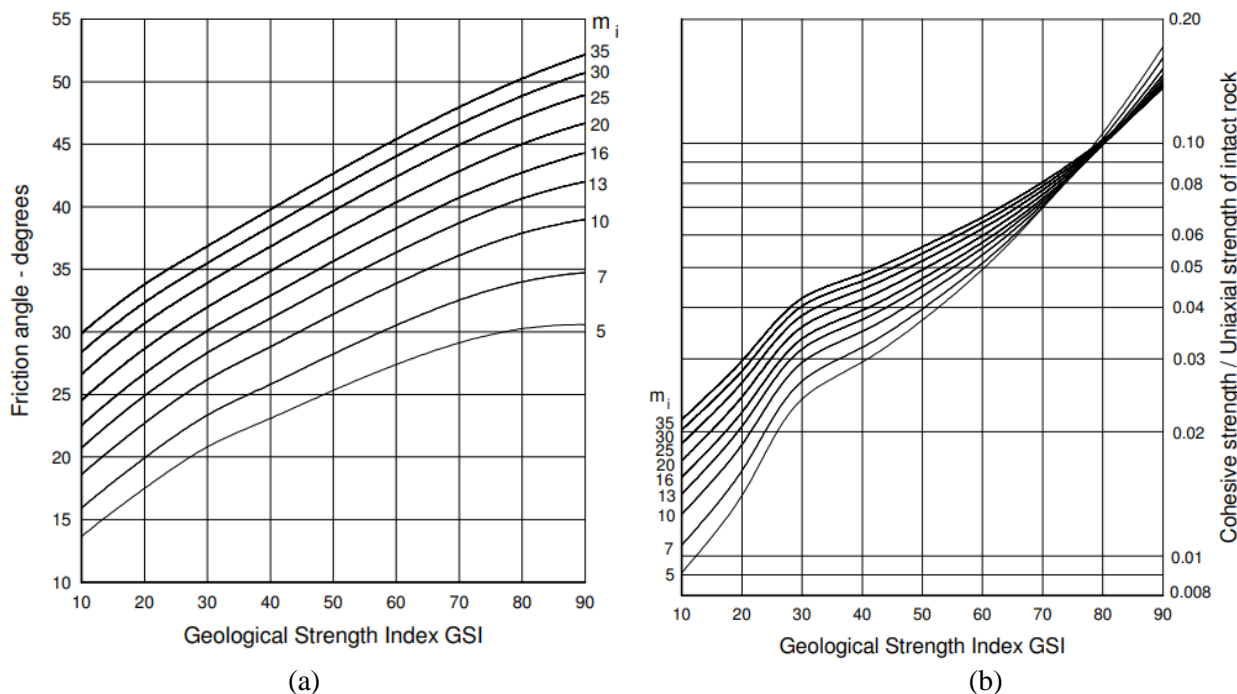


Figura 3. Relação entre o ângulo de atrito, (a) para diferentes combinações de GSI e m_i e a (b) coesão e resistência à compressão uniaxial de rocha intacta.

4 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

4.1 Materiais e Método

Para determinação do fator de segurança as análises foram realizadas simulando três inclinações finais para os taludes de corte. As duas primeiras inclinações remetem a premissas geométricas pré-determinadas em projeto. A terceira inclinação foi definida através da determinação do fator de segurança mínimo, ou seja, a inclinação do talude rochoso foi levado no limite até que se atingisse o menor fator de segurança determinado em projeto. Para determinação dos fatores de segurança mínimos foram definidas três condições de projeto (tabela 3). Uma carga pontual normal de 324 kPa foi aplicada na face superior da cunha para representar a sobrecarga de solo, correspondente aos materiais solo residual A e B. Para todas as análises, foi definida uma condição de poropressão apenas nas descontinuidades, considerando 100% do espaço das juntas preenchido com água. Os programas RocTopple (Versão 2.004) e Swedge (Versão 7.014) da Rocscience foram utilizados para modelar o talude de corte, na sua porção rochosa. A Tabela 4 mostra os parâmetros de material atribuídos à seção transversal do talude para os modelos analisados obtidos a partir de correlações com o índice de resistência geológica (GSI) e a constante do material (m_i) de Hoek e Brown (1997) para representar uma classificação de massa rochosa (RMR) classe III.

De acordo com as análises das seções, baseada nas interpretações das sondagens mistas, somente o maciço classe III, correspondente a rocha intemperizada, está representada nas seções analisadas.

Foi adotado um coeficiente de aceleração sísmica horizontal (k_h) de 0,33 para a condição de carregamento pseudoestático. As quatro seções analisadas foram as que apresentaram os taludes com a maior exposição de rocha, dentro dos segmentos que apresentaram a maior probabilidade de ocorrência de falha por tombamento e escorregamento em cunha. Foi adotada uma análise determinística de blocos rígidos considerando a dimensão da cunha, parâmetros de resistência ao cisalhamento (modelo constitutivo de Mohr-Coulomb) em cada plano de deslizamento e forças externas. Para realizar as análises de estabilidade por tombamento foram obtidas o espaçamento e o mergulho das descontinuidades, além da geometria dos cortes, com bermas de cinco m de largura e inclinação de zero. O espaçamento entre as descontinuidades variou de 0,1 a 0,6 m e o mergulho máximo foi de 89° . A análise de estabilidade para o processo de deslizamento em cunha utilizou o mergulho para as duas descontinuidades de 42° e 65° . A geometria para o talude de corte foi o mesmo para o tombamento.

Tabela 3. Fatores de segurança mínimos para as condições de projeto (CDA, 2014).

Condição	Fator de Segurança
Longo Prazo (local e global)	1,5
Pseudostático	1.0

Tabela 4. Parâmetros geotécnicos da rocha.

Material	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito ($^\circ$)	Resistência a tração (kPa)
Granodiorito	23	70	46	0

4.2 Resultados

As tabelas 5 e 6, apresentam os resultados das análises de estabilidade realizados para os processos instabilizadores que apresentaram maior probabilidade de ocorrência na análise cinemática.

Tabela 5. Resultados da análise de estabilidade para tombamento.

Estaca	Inclinação		Fator de Segurança	
	Ângulo ($^\circ$)	Altura (m)	Longo Prazo (local e global)	Pseudostático
0+000	1H:1V	6	3,00	2,24
	0.66H:1V		1,96	1,80
	0.4H:1V		1,50	1,37
2+870	1H:1V	9,6	3,11	1,86
	0.74H:1V		2,14	1,41
	0.53H:1V		1,51	1,11
2+910	1H:1V	10,4	3,19	1,88
	0.75H:1V		2,20	1,44
	0.55H:1V		1,56	1,11
3+030	1.33H:1V	30,5	1,88	1,28
	1.15H:1V		1,54	1,12

Tabela 6. Resultados da análise de estabilidade para deslizamento em cunha.

Estaca	Inclinação		Fator de Segurança	
	Ângulo (°)	Altura (m)	Longo Prazo (local e global)	Pseudostático
	1H:1V		14,48	7,23
0+000	0.4H:1V	6	12,95	6,27
	0H:1V		12,14	5,80

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A extrapolação das informações pontuais das sondagens para determinação do limite entre solo e rocha teve o apoio fundamental da investigação geofísica. Apesar da boa cobertura das investigações geotécnicas e das informações coletadas no levantamento de campo, os mais de 3 km do eixo do canal ainda precisam evoluir para um conhecimento mais aprofundado, principalmente quanto aos perfis de intemperismo ao longo do seu eixo. Ainda existe uma zona dentro do perfil de intemperismo a ser explorada por não apresentar, até o momento, sondagens que verifiquem a transição dos materiais entre as classes V e IV, com RQD superior a 15. A percepção de campo sobre a divisão do eixo em duas áreas com predominância de matriz arenosa e argilosa pode ser fundamentada na distribuição dos litotipos. O segmento com predominância de matriz arenosa pode ser originário de rocha graníticas. Assim, o trecho com predominância de blocos envoltos em matriz argilosa pode indicar o segmento do canal com predominância do granodiorito ou diorito. Através da análise de investigações geotécnicas complementares é possível que sejam analisadas seções que apresentem materiais com resistência inferior a classe III, encontrada nas seções de projeto e verificadas nesse artigo e ratifique a percepção de campo, quanto a segmentação litológica percebida em campo.

Apesar das incertezas a serem elucidadas quanto as propriedades geotécnicas dos materiais, o levantamento estrutural trouxe fundamentais informações a respeito da geometria das descontinuidades. As geometrias impostas buscando os menor fatores de segurança, apresentaram-se exequíveis para implantação do canal e mesmo com a imposição do carregamento sísmico, atendem ao mínimo determinado em projeto. A segurança quanto a aderência do fator de segurança com os dados estruturais levantados está na incompatibilidade das direções das descontinuidades com a direção do eixo do canal, nos seus 27 segmentos analisados, ou seja, as direções das principais descontinuidades não são paralelas as direções do alinhamento do canal. Os resultados apresentados mostrando as baixas probabilidades de falha para os diversos processos estabilizadores corroboram com os fatores de segurança encontrados, alguns muito elevados, como os encontrados para o deslizamento em cunha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Hatch Engenharia pelo apoio para elaboração e apresentação desse artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hoek, E. and Brown, E.T. (1997) Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts*. 34(8), p1165-1186.

CDA, 2014. Technical Bulletin: Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams.