

**COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS ANISOTRÓPICOS E  
APLICABILIDADE EM MACIÇOS EXTREMAMENTE ANISOTRÓPICOS NA  
CAVA SERRA DO SAPO**

Thaís Souza <sup>1</sup>; Yan Santos <sup>2</sup>; Lucas Figueiredo <sup>3</sup>; Felipe Vilela <sup>4</sup>

**Resumo** – Existem diversos modelos disponíveis para representar a anisotropia dos maciços rochosos nos *softwares* de análise de estabilidade por equilíbrio limite. Dessa forma, faz-se necessário entender a diferença entre eles, bem como o impacto da utilização de cada modelo nos fatores de segurança obtidos nas análises e conseqüentemente na geometria das cavas. O estudo em questão teve como objetivo detalhar os modelos anisotrópicos, aplica-los e compara-los para um litotipo presente na cava Serra do Sapo, de propriedade da empresa Anglo American, de forma a estabelecer um modelo final a ser adotado nas análises de estabilidade da cava.

**Abstract** – There are several models available to represent the anisotropy of rock masses in limit equilibrium stability analysis software. In this way, it is necessary to understand the difference between them, as well as the impact of using each model on the factor of safety obtained in the analyzes and consequently on the pit layout. The study in question aimed to detail the anisotropic models, apply them and compare them for a lithotype present in the Serra do Sapo pit, owned by the Anglo American company, in order to establish a final model to be adopted in the stability analysis of the pit.

**Palavras-Chave** – Análise de estabilidade de cava, Anisotropia, Modelos Anisotrópicos.

---

<sup>1</sup> Geól., Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte - MG, thaisalcsouza13@gmail.com  
EMPRESA: WALM Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) 3234-4003, thaisa.souza@walmengenharia.com.br

<sup>2</sup> Geól., Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte - MG, yanlucas2002@gmail.com  
EMPRESA: WALM Engenharia, Belo Horizonte – MG, (31) 3234-4003, yan.santos@walmengenharia.com.br

<sup>3</sup> Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto: Ouro Preto - MG, torrent.figueiredo@gmail.com  
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 98402-2195, lucas.t.figueiredo@angloamerican.com

<sup>4</sup> Geól., Universidade Federal do Espírito Santo: Alegre – ES, felipevilelageo@gmail.com  
EMPRESA: Anglo American, Belo Horizonte – MG, (31) 99871-0434, felipe.vilela@angloamerican.com

## 1. INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes rochosos é um ramo de extrema relevância para obras civis e de mineração, uma vez que as consequências causadas pelas rupturas em taludes são em sua maioria, inestimáveis. Normalmente, o padrão estrutural das feições existentes no maciço rochoso de cava a céu aberto é a principal condicionante na estabilidade dos taludes. Esse fato ocorre, principalmente, em maciços de rochas medianamente alteradas a sãs, devido à alta resistência da matriz rochosa em relação às estruturas geológicas existentes, tais como: foliação, bandamento, xistosidade, falhas, fraturas, dentre outras

Na avaliação de estabilidade de taludes em maciços rochoso anisotrópicos é importante o entendimento que o mecanismo de ruptura é altamente influenciado pela presença dessas estruturas (foliação, xistosidade, bandamento, falhas e etc), que representam planos de fraqueza no maciço.

## 2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A Mina Serra do Sapo localiza-se a nordeste da cidade de Conceição do Mato Dentro (CMD), sudeste do estado de Minas Gerais e dista cerca de 164 km da capital. A Figura 1 apresenta a localização da mina do sapo em relação à Belo Horizonte.

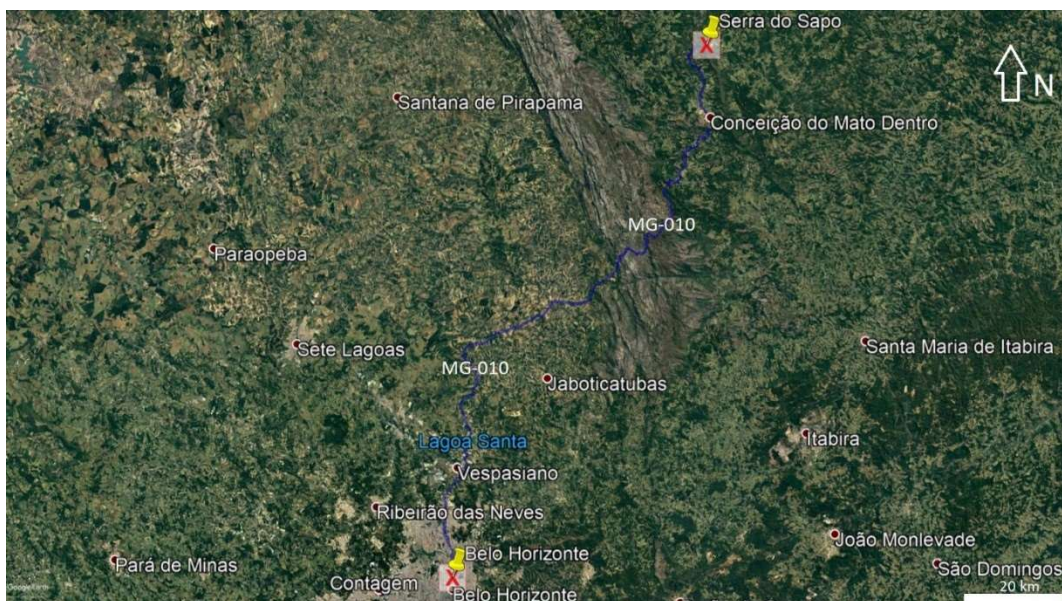


Figura 1. Localização da Mina Serra do Sapo em relação à Belo Horizonte.

A cava Serra do Sapo, avaliada neste estudo, possui *trend* estrutural NNW-SSE e, assim como observado em escala regional, verifica-se uma inversão estratigráfica em virtude da estruturação tectônica caracterizada por um sistema de falhas de empurrão de baixo a médio ângulo de direção N-S e vergência para W, definidas como zonas de cisalhamento dúcteis a dúcteis-rúpteis.

Verificou-se que, de forma geral, o *trend* das camadas apresenta direção geral N-S com mergulhos baixos (30°) para E. A foliação gerada pelo cavalgamento em estado dúctil, apresenta-se invariavelmente subparalelizada ao *trend* geral e se expressa por diversas formas, tais como: xistosidade, foliação gnáissica, bandamento composicional e etc.

A Figura 2 abaixo apresenta uma seção típica em que é possível observar a inversão estratigráfica e os principais domínios litológicos.

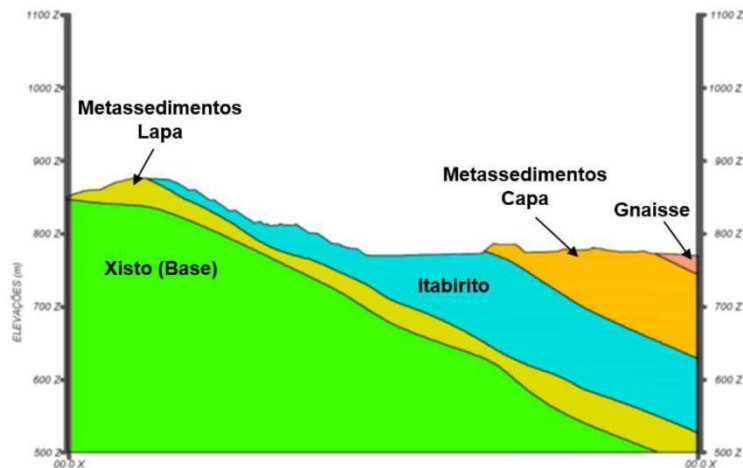


Figura 2. Seção típica da Serra do Sapo em que é possível observar a inversão estratigráfica e os principais domínios litológicos.

Na cava da Serra do Sapo verifica-se que o mecanismo de ruptura é condicionado pela anisotropia de resistência condicionada pela foliação, por falhas paralelas à foliação, geradas nesse processo de cavalgamento, e aos contatos geológicos, assim como pode ser observado na Figura 3. Nesses casos as rupturas possíveis de ocorrer são denominadas do tipo plano-circular, onde são mobilizadas resistências da matriz e da estrutura condicionante paralela à direção do talude ou da encosta. Em alguns *softwares* de análise de estabilidade esse tipo de ruptura é denominado como “não-circular”.

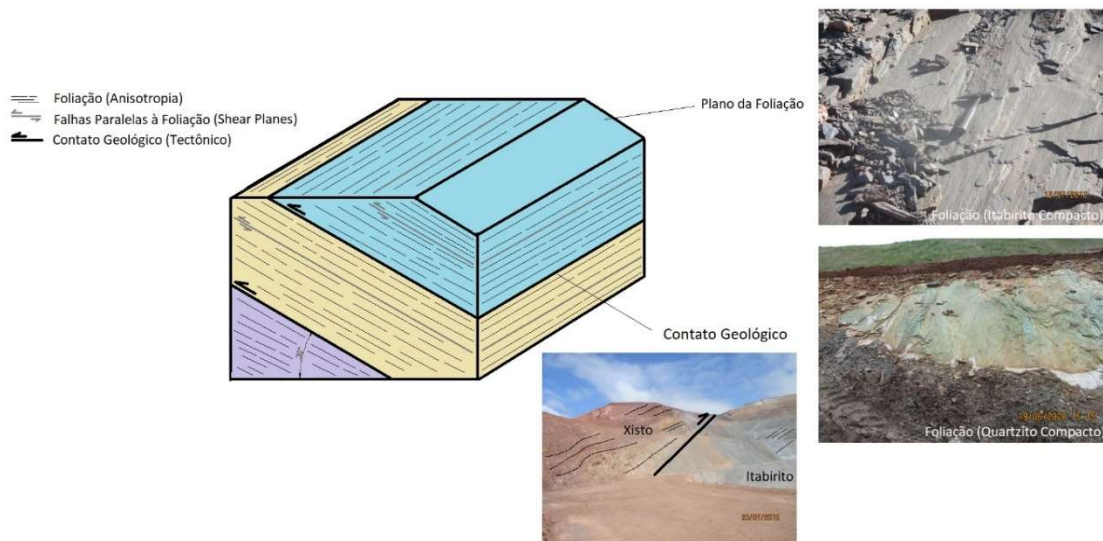


Figura 3. Estruturas condicionantes do mecanismo de ruptura na cava da Serra do Sapo.

### 3. MODELOS ANISOTRÓPICOS

Um modelo de resistência anisotrópico pode ser definido como um modelo constitutivo que descreve a resistência ao cisalhamento de um maciço anisotrópico em relação à mudança no ângulo entre o plano de cisalhamento e o plano de fraqueza predominante do maciço rochoso ou em relação à orientação predominante da principal fraqueza estrutural (Mercer, 2012).

Nos *softwares* de análise de estabilidade disponíveis na atualidade existem diversas opções de modelos para representar os maciços anisotrópicos. Neste estudo será apresentada uma

comparação entre os modelos disponíveis no *software* Slide2 de propriedade da Rocscience® e sua aplicabilidade no estudo de caso em questão, sendo estes:

- *Anisotropic Strength*;
- *Anisotropic Function*;
- *Anisotropic Linear*;
- *Generalized Anisotropic*;
- *Snowden Modified Anisotropic Linear*.

### 3.1. Anisotropic Strength

O modelo “*Anisotropic Strength*” permite definir propriedades de resistência, coesão e ângulo de atrito, ao longo de dois eixos perpendiculares. Sendo que esses eixos podem ser especificados em um ângulo arbitrário (ângulo da anisotropia), conforme mostrado na Figura 4 abaixo.

Os valores de coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito ( $\Phi$ ) para qualquer plano arbitrário (ângulo  $\alpha$ ) são dados por:

$$c = c_1 \cos^2 \alpha + c_2 \sin^2 \alpha$$

$$\Phi = \Phi_1 \cos^2 \alpha + \Phi_2 \sin^2 \alpha$$

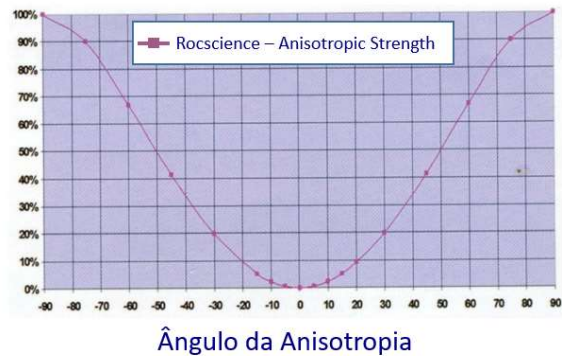
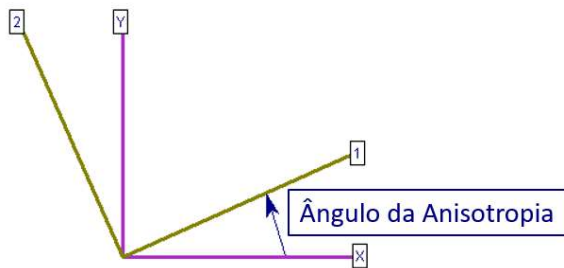
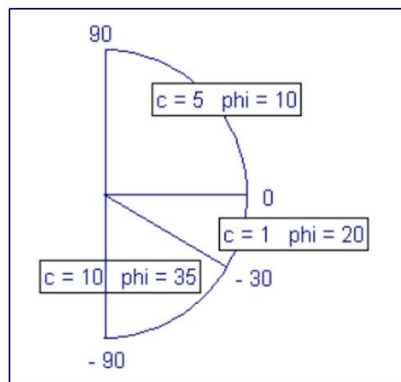


Figura 4. Definição dos eixos e ângulo para o modelo “*Anisotropic Strength*”.

Fonte: Modificado de <https://www.rocscience.com/>

### 3.2. Anisotropic Function

O modelo “*Anisotropic Function*” permite definir intervalos angulares discretos de inclinação da base da fatia, cada um com sua própria coesão e ângulo de atrito, assim como demonstrado na Figura 5.



Modelo “*Anisotropic Function*” com 3 ranges

- -90 até -30:  $c = 10$  e  $\Phi = 35$
- -30 até 0:  $c = 1$  e  $\Phi = 20$
- 0 até 90:  $c = 5$  e  $\Phi = 10$

Figura 5. Exemplo de modelo “*Anisotropic Function*” com 3 ranges.

Fonte: Modificado de <https://www.rocscience.com/>

### 3.3. Anisotropic Linear

O modelo “*Anisotropic Linear*” (Snowden, 2007) foi desenvolvido pela divisão de geotecnia da empresa “*Snowden Mining Industry Consultants*” para implementação e aplicação no *software* Slide da Rocscience.

De acordo com simulações de teste (Snowden, 2007), a transição da resistência do plano de anisotropia para o plano do maciço rochoso não é exatamente linear. No entanto, para simplificação dos dados de entrada, foi feita a suposição linear. Este modelo permite definir um material anisotrópico a partir dos dados de entrada descritos abaixo e detalhados na Figura 5:

- A coesão e o ângulo de atrito ( $c_1, \phi_1$ ) definem a resistência mínima ao cisalhamento do plano de anisotropia;
- A coesão e o ângulo de atrito ( $c_2, \phi_2$ ) definem a resistência máxima ao cisalhamento da massa rochosa;
- Ângulo de orientação do plano da anisotropia a partir da horizontal;
- Parâmetros A e B que definem uma transição linear da resistência do plano de anisotropia para a resistência do maciço rochoso, em relação à orientação do plano de cisalhamento. Sendo o parâmetro “A” a variação natural do mergulho (*dip*) da anisotropia (foliação, xistosidade, bandamento, etc) e o parâmetro “B” a transição entre os parâmetros paralelo ( $c_1, \phi_1$ ) e o oblíquo ( $c_2, \phi_2$ ), ou seja, um contraste da anisotropia, tem-se que quanto maiores os valores A e B, mais conservador o modelo.

O modelo é baseado no critério de Mohr-Coulomb e assume que a resistência ao cisalhamento mínima ocorre na direção da superfície da anisotropia (foliação, xistosidade, bandamento, etc.), correspondente ao plano de direção 1 na Figura 6 abaixo.

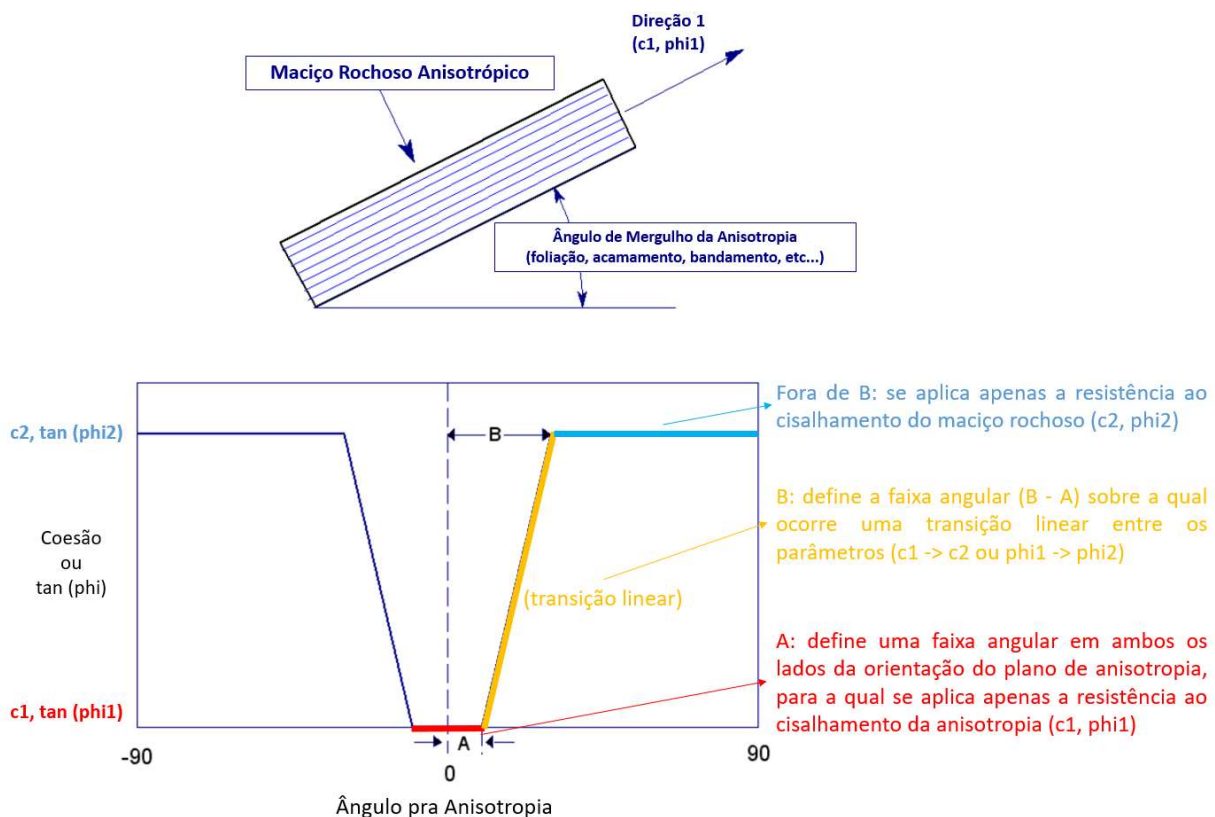


Figura 6. Definição do modelo “Anisotropic Linear” e descrição dos parâmetros de entrada.

Fonte: Modificado de <https://www.rocscience.com/>

### 3.4. Generalized Anisotropic

O modelo “*Generalized Anisotropic*” está presente no *software Slide* de propriedade da Rocscience® e se assemelha ao modelo “Anisotropic Function” apresentado no Item 3.2, porém ao invés de criar ranges de parâmetros de coesão e ângulo de atrito, no “Generalized Anisotropic” é possível criar um material composto com qualquer critério de resistência presente no *software Slide* a qualquer intervalo de orientações de base de fatia.

O modelo “*Generalized Anisotropic*” é baseado no “*Anisotropic Linear*” em que o ângulo do parâmetro A é igual a zero, então a função linear segue conforme apresentado na Figura 7.

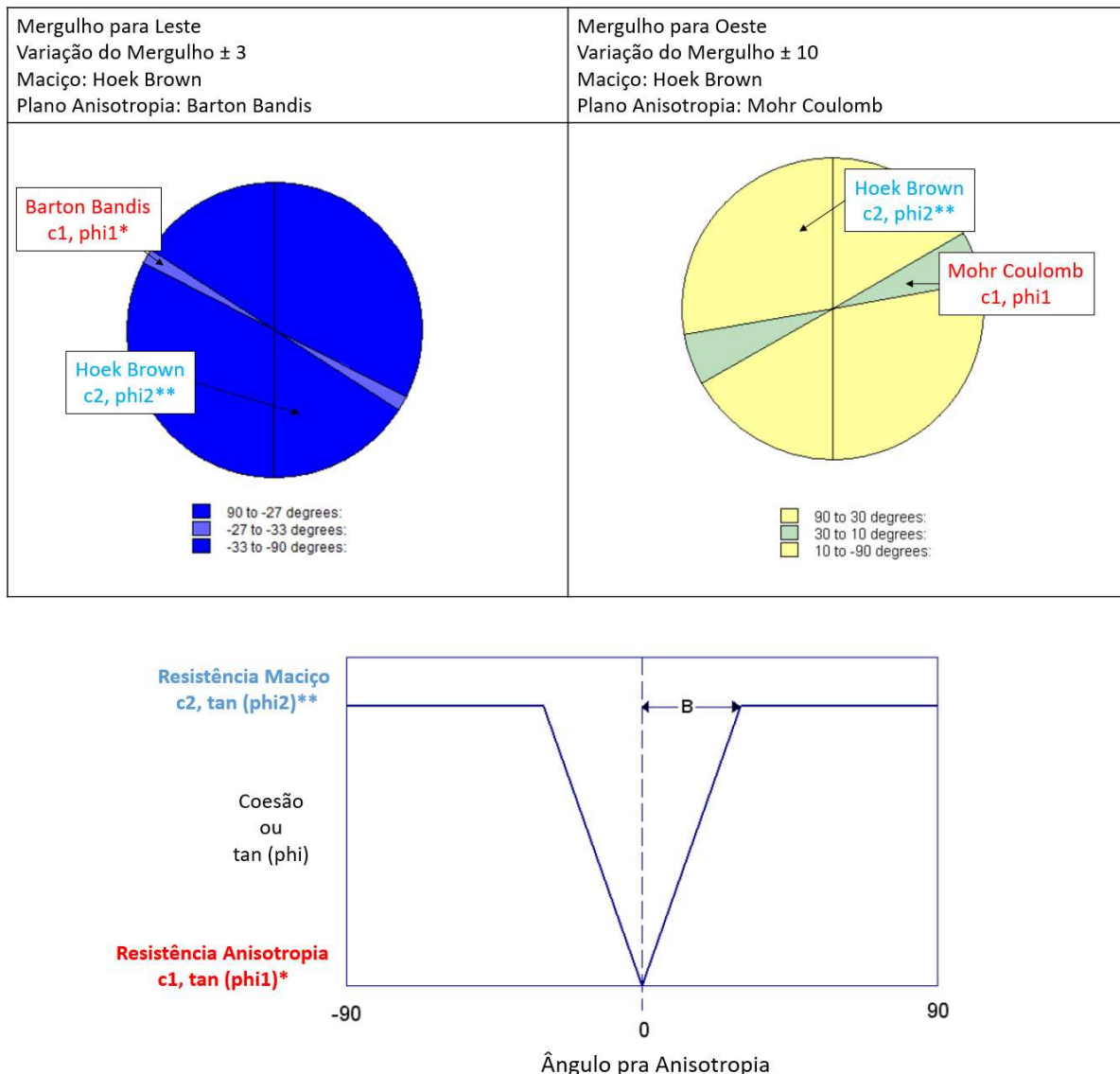


Figura 7. Exemplos do modelo “Generalized Anisotropic” com diferentes direções, ranges e modelos de resistência aplicados. Fonte: Modificado de <https://www.rocscience.com/>

### 3.5. Snowden Modified Anisotropic Linear

O modelo “*Snowden Modified Anisotropic Linear*” (Snowden, 2011) é baseado no modelo “Anisotropic Linear”, com a diferença que permite que você defina envelopes de resistência dependentes de tensão não linear para as resistências paralelas e oblíquas ao plano da anisotropia. Dessa forma é possível definir uma função de resistência *shear/normal* inserindo dados de tensão normal e cisalhamento no *software Slide*.

#### 4. APLICAÇÃO DOS MODELOS ANISOTRÓPICOS NO ESTUDO DE CASO

A partir do entendimento dos modelos anisotrópicos disponíveis verificou-se a aplicabilidade de cada um desses no estudo de caso atual, bem como o impacto desses no fator de segurança e consequentemente na geometria da cava avaliada.

Decidiu-se realizar esta avaliação de teste dos modelos anisotrópicos com o litotipo Quartzito Sericítico Friável (QTSF), uma vez que este se encontra atrás minério (itabirito), ou seja, é o material de lapa e frequentemente se encontra exposto nos taludes da cava com a lavra do minério. A Figura 8 apresenta esquematicamente a estratigrafia da cava Serra do Sapo, bem como uma caracterização fotográfica da anisotropia, em diferentes escalas, presente no litotipo QTSF avaliado no presente estudo.

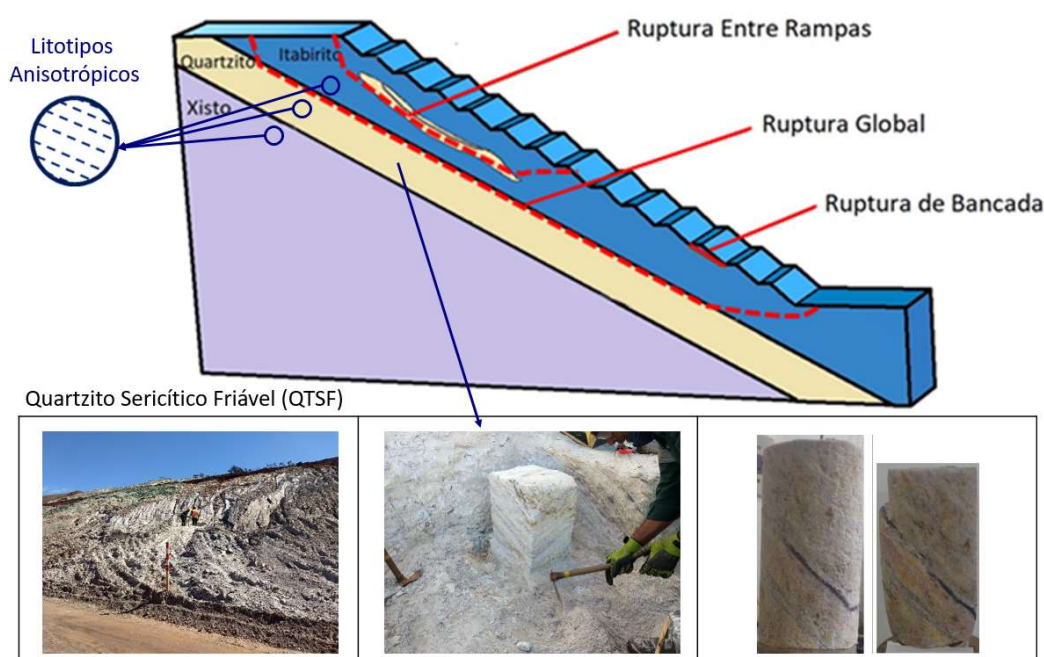


Figura 8. Estratigrafia e mecanismos de ruptura esquemáticos da cava Serra do Sapo. Detalhe da anisotropia do litotipo QTSF.

Na Tabela 1 estão apresentados os parâmetros geotécnicos do litotipo QTSF, que foram obtidos a partir da análise dos resultados de três campanhas de ensaios realizadas pela Universidade Federal de Viçosa em 2014, 2016 e 2020. É importante mencionar que as avaliações foram realizadas em termos de parâmetros efetivos.

Tabela 1. Parâmetros de resistência – Litotipo Quartzito Sericítico Friável (QTSF).

Litotipo	ID	Parâmetros de Resistência						Observações
		Caracterização		Resistência Ortogonal		Resistência Paralela		
		$\gamma_{seco}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	coesão (KPa)	atrito (°)	coesão (KPa)	atrito (°)	
Quartzito Sericítico Friável	QTSF	18	20	56	34	24	30	Parâmetros baseados em 4 ensaios de cisalhamento direto e 9 ensaios triaxiais CIUsat.

Dessa forma, segue na Figura 9 uma comparação dos principais modelos anisotrópicos (*Anisotropic Function*, *Anisotropic Linear* e *Anisotropic Strength*), apresentados no Item 3, e seus efeitos no parâmetro da coesão do litotipo QTSF.

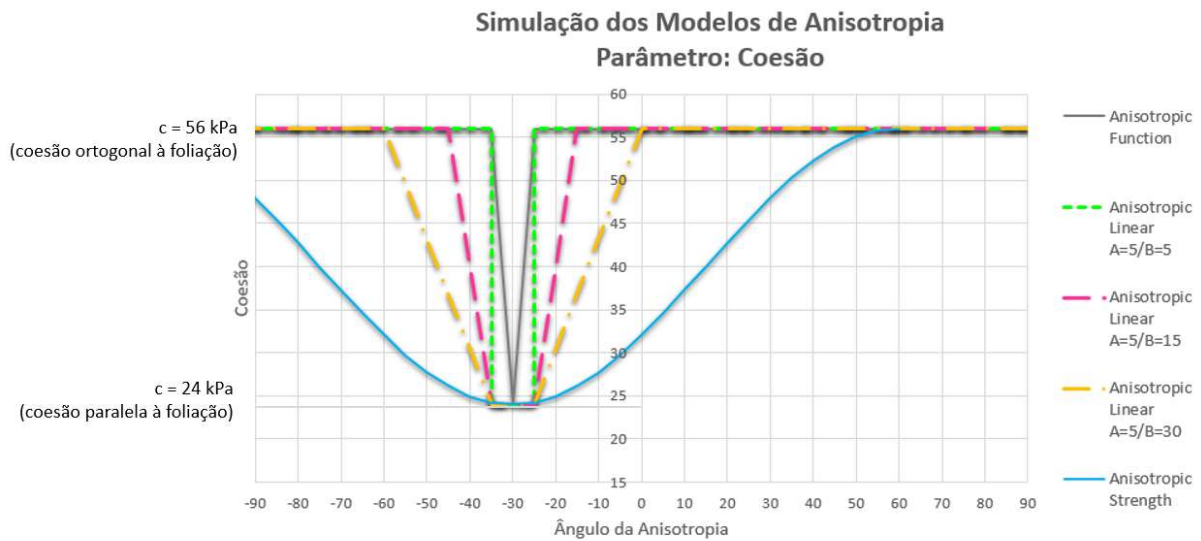


Figura 9. Comparação dos modelos anisotrópicos em relação à variação do parâmetro da coesão do litotipo QTSF.

Vale mencionar alguns pontos que foram levados em consideração para a seleção de tais modelos anisotrópicos apresentados na Figura 10:

- Foi considerado três ranges angulares com os parâmetros da Tabela 1, assim como demonstrado na Figura 9 abaixo:

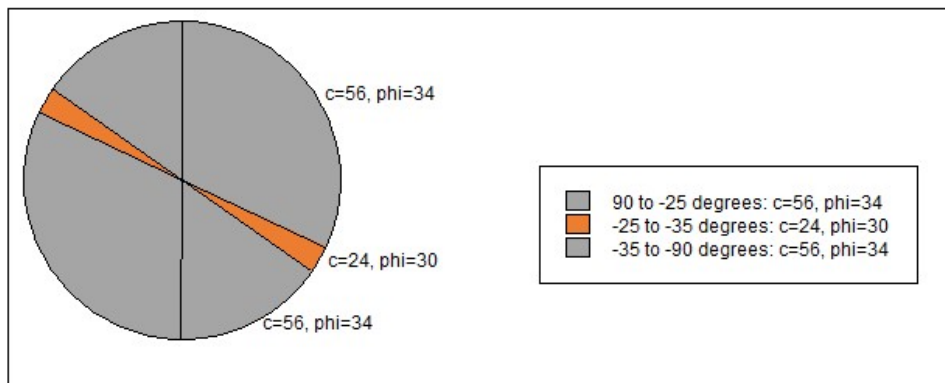


Figura 10. Range angulares e parâmetros adotados no modelo "Anisotropic Function".

- Adotou-se o parâmetro "A" do modelo "*Anisotropic Linear*" com o valor  $A=5$ , uma vez que esse valor já vem sendo adotado de acordo com referências bibliográficas, como mencionado em Bar & Weekes (2017);
- Variou-se o valor do parâmetro "B" do modelo "*Anisotropic Linear*" de forma a verificar o impacto dessa transição nas análises de estabilidade. Assim como é possível verificar no gráfico da Figura 7, quanto maior o valor de "B", mais o modelo "*Anisotropic Linear*" se aproxima do modelo "*Anisotropic Strength*".



As análises de estabilidade dos taludes para estudo dos modelos anisotrópicos foram realizadas com o *software* Slide2 versão 9.008, desenvolvido pela empresa Rocsciense®, de acordo com os critérios e premissas descritos abaixo:

- Rupturas em nível de entre rampas, assumindo-se mecanismos do tipo plano-circular;
- Avaliação da geometria apresentada na Figura 11: ângulo de face de 35°, altura de bancada de 15 m, largura de berma de 10 m, altura de entre rampas de 90 m (6 bancos);



Figura 11. Geometria avaliada nas análises.

- Ângulo de mergulho da anisotropia de 30° de acordo com a avaliação de dados estruturais;
- Foi utilizado o método de busca *Simulated Annealing* nas análises com a função *Optimize Surfaces* do tipo *Surface Altering*;
- Foi considerado o método das fatias GLE/Morgenstern-Price;
- O talude foi considerado como seco.

A partir das premissas estabelecidas, segue na Figura 12 os resultados obtidos nas análises de estabilidade para os modelos anisotrópicos avaliados.

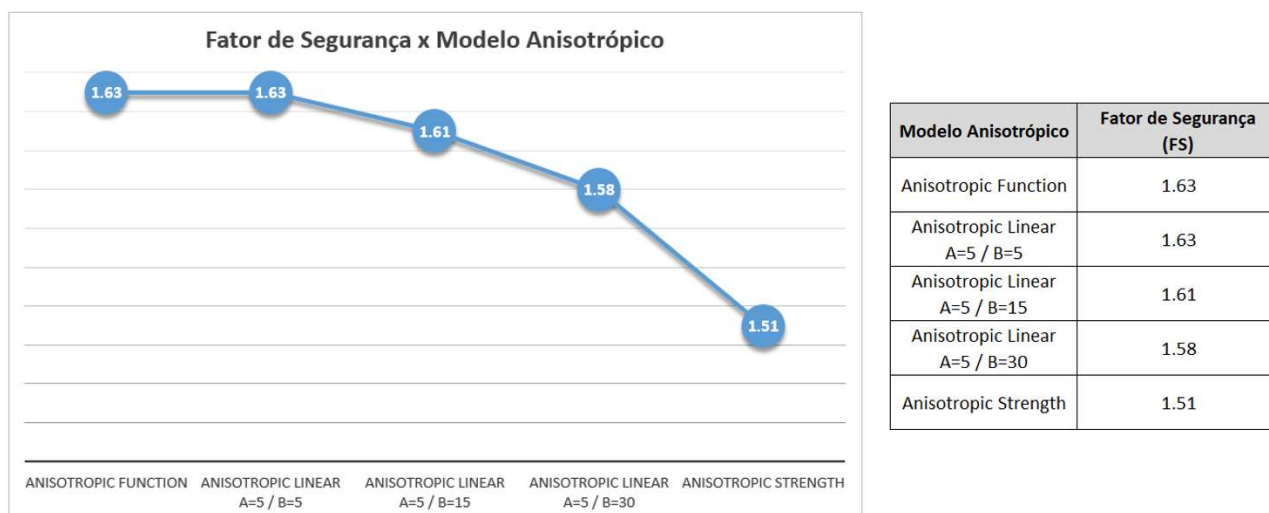


Figura 12. Resultados obtidos nas análises de estabilidade para os modelos anisotrópicos avaliados.

## 5. CONCLUSÕES

Verifica-se que o modelo “*Anisotropic Strength*” além de ser o mais conservador (menor fator de segurança), também não permite calibração, já que não há dados de entrada além dos parâmetros de resistência do material e o ângulo da anisotropia.

Em relação aos modelos “*Anisotropic Linear A=5 / B=5*” e “*Anisotropic Function c/ 3 ranges*” pode-se concluir que estes são mais ousados, ou seja, apresentam os maiores fatores de segurança das análises de estabilidade e, dessa forma, devem ser utilizados com cautela. Vale ressaltar que o modelo “*Anisotropic Function*” foi avaliado em apenas um cenário de ranges angulares e ainda pode ser explorado em termos de calibração.

O modelo “*Anisotropic Linear A=5 / B=30*” apresentou um resultado moderado em termos de fator de segurança e acredita-se ser o que mais representa o maciço avaliado no estudo atual, uma vez que este apresenta-se forte anisotropia, devido ao processo de cisalhamento e logo, ocorre uma maior transição entre as resistências paralelas e ortogonais à foliação (maiores valores do parâmetro B).

A partir deste estudo recomenda-se que esses parâmetros e modelos sejam validados a partir de sua aplicação no campo, de forma a verificar se realmente refletem a realidade dos materiais e do modelo da cava.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Anglo American pelo fornecimento dos dados para realização deste estudo.

## REFERÊNCIAS

BAR, N. and G. WEEKES, 2017. Directional shear strength models in 2D and 3D limit equilibrium analyses to assess the stability of anisotropic rock slopes in the Pilbara Region of Western Australia. *Australian Geomechanics Journal*. 52: 4, 91-104.

MERCER, K. G., 2012. The history and development of the anisotropic linear model: part 1, *Australian Centre for Geomechanics Newsletter*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Vol. 38, July 2012, pp. 13–16.

SNOWDEN, 2007. “Proposal for Additional Features in Slide2 and SWEDGE”, unpublished memorandum to Rocscience, 5th April 2007.

SNOWDEN, 2011. “Snowden Modified Anisotropic Linear strength model”, unpublished memorandum to Rocscience, November 2011.