



GEOTECNIA APLICADA À MINERAÇÃO

GEO**MIN**

1ST INTERNACIONAL CONFERENCE
ON GEOTECHNICS OF TAILINGS
AND MINE WASTE

2023

Análise Comparativa de Critérios de Ruptura para Estabilidade de Taludes de uma Cava a Céu Aberto Através do Plaxis

Gabriella Quaresma
gabriella.quaresma@hidrobr.com

Marko Rupert
Ingrid Rigatto
Fernanda Barbaro Franco

Introdução

- ❖ Na engenharia geotécnica frequentemente são utilizados métodos de equilíbrio-limite para a resolução de problemas de estabilidade de taludes;
- ❖ Para a execução das análises de equilíbrio-limite, um dos pontos mais importantes é a definição prévia do critério e condição de ruptura que seja plausível com o que ocorre em campo;
- ❖ Quando um talude rompe, pode fornecer uma fonte útil de informações sobre as condições no talude no momento da ruptura, bem como uma oportunidade para validar métodos de análise de estabilidade.



Introdução

- ❖ Estudo de caso de uma cava em processo de recuperação;
- ❖ Localizada em MG;
- ❖ Predominância de rochas brandas em elevado estágio de intemperismo;
- ❖ Deslizamento planar na porção central da cava;
- ❖ Flancos da cava permaneceram estáveis;

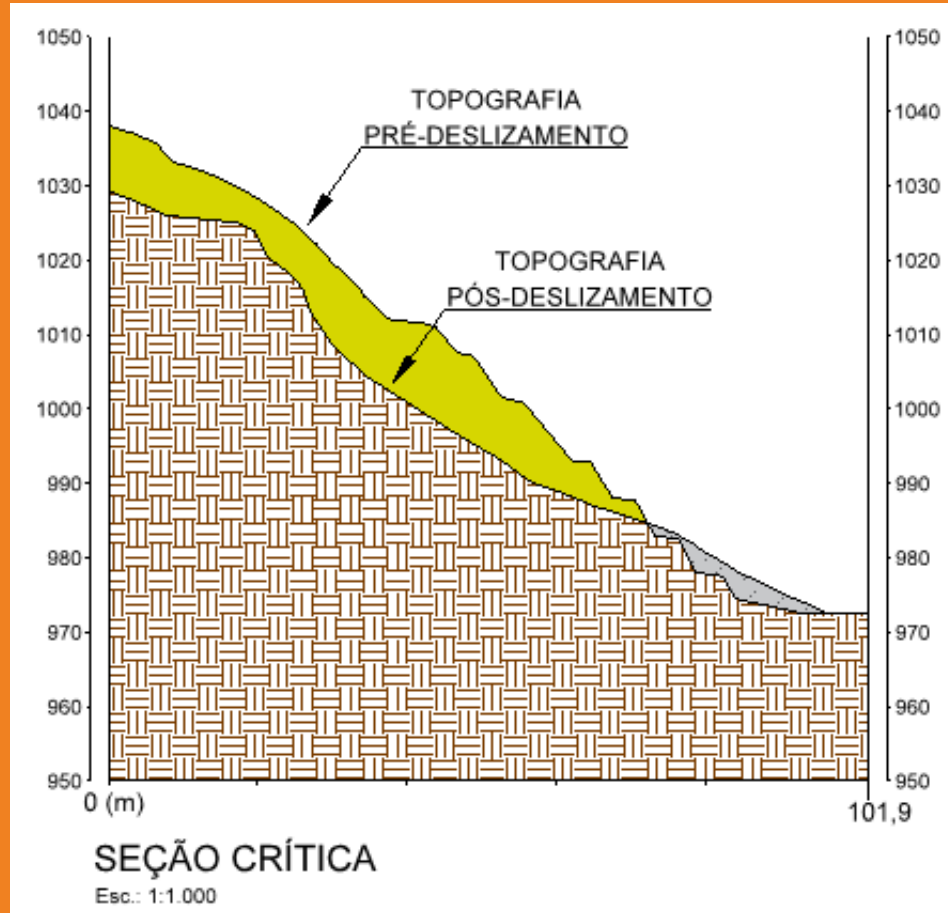


Objetivos

- ❖ Traçar uma comparação (2D) entre 3 dos mais utilizados critérios de ruptura (Hoek-Brown, Mohr-Coulomb e Anisotropic Strength) com o intuito de avaliar qual o mais plausível para o cenário real avaliado;

Sobre a Cava

- ❖ 40 m de altura;
- ❖ Bancos de 6 m de altura e ângulo de face próximo a 72°;
- ❖ Sem estruturas de drenagem superficial;
- ❖ Complexidade da geologia local;



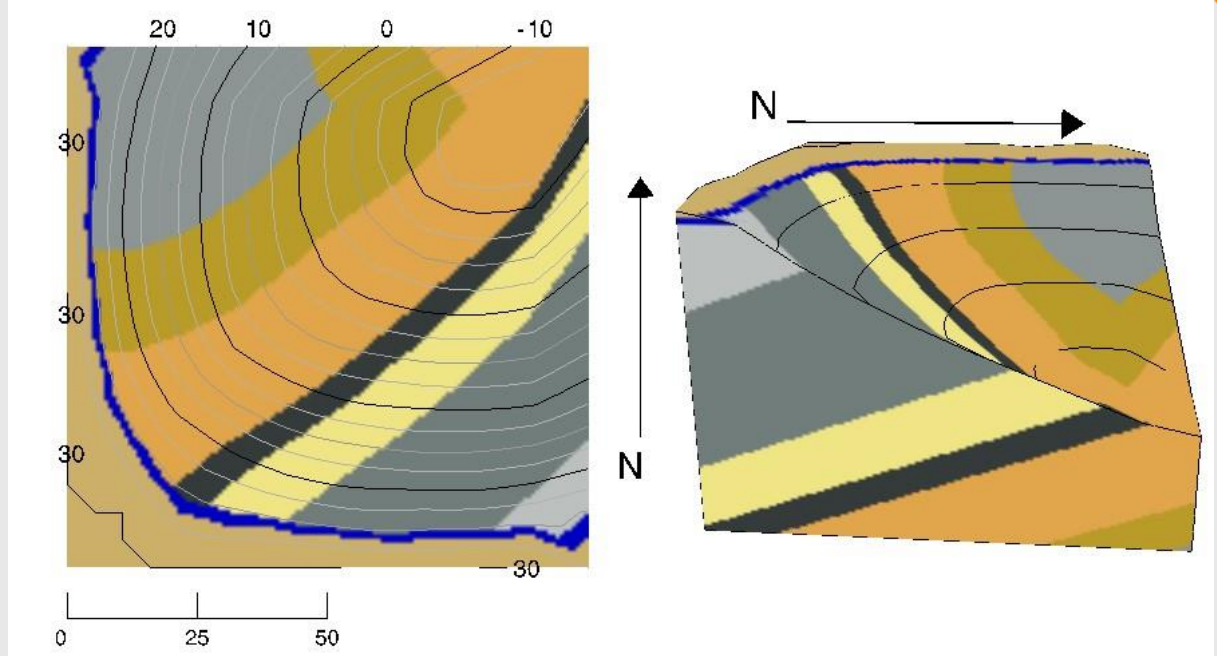
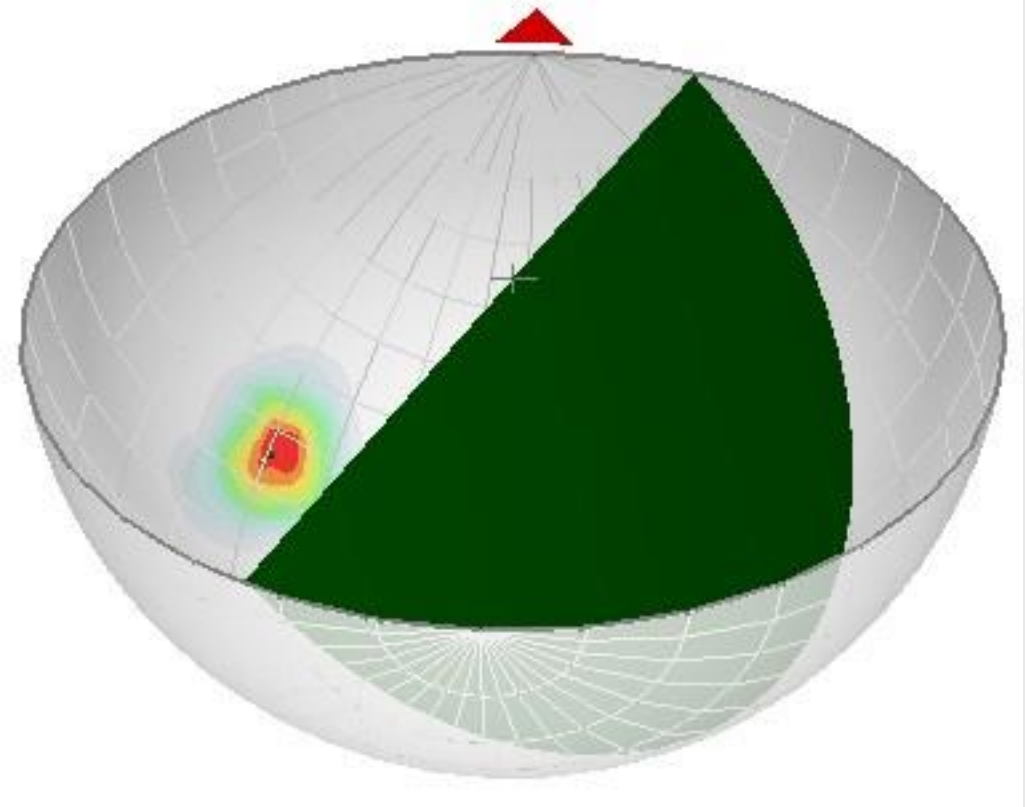












<https://app.visiblegeology.com>

Metodologia – Retroanálise

- ❖ Os parâmetros de resistência foram determinados após inúmeras análises de estabilidade, com diferentes combinações de valores de “c” e “ ϕ ” e demais parâmetros (Hoek Brown), realizadas de maneira a se atingir um fator de segurança próximo de 1,0 (um) para a ruptura ao mesmo tempo em que a forma da superfície se aproxime da ruptura real tanto em projeção quanto em profundidade.
- ❖ Ponto de partida: parâmetros típicos de rochas brandas da literatura (e.g. Hunt, 1984; Lopes et al., 2007; Shen et al., 2013; Araújo et al., 2014)

Caracterização e Parâmetros

- ❖ Filito R1
- ❖ Filito R2
- ❖ Xisto R2

GRAU DE RESISTÊNCIA				
Grau	Denominações	RCU*	I.S**	Definição para uso em campo
R6	Extremamente resistente	> 250	>10	Pode apenas ser lascado após sucessivos golpes de martelo e ressoa com o impacto do golpe
R5	Muito resistente	100 – 250	4-10	Requer muitos golpes do martelo para quebrar
R4	Resistente	50 – 100	2-4	Requer mais de um golpe do martelo de geólogo para quebrar; traça com o canivete.
R3	Medianamente resistente	25 – 50	1-2	Não pode ser raspado ou descascado com um canivete, todavia pode ser riscado, Requer apenas um único golpe firme do martelo para quebrar.
R2	Brando	5-25	-	Pode ser descascado com dificuldade pela lâmina de um canivete, buracos rasos podem ser criados com uma pancada firme da ponta do martelo geológico. Fragmenta-se com um golpe firme do martelo.
R1	Muito brando	1 – 5	-	Estárela sob golpes firmes da ponta do martelo, pode ser raspado e descascado pela lâmina do canivete. Traça com a unha e quebra-se a bordas com a pressão dos dedos.
R0	Extremamente brando	0.25 – 1.0	-	Riscado pela unha e desagrega sobre a pressão dos dedos.

Grau de resistência segundo Norbury, 2010

Caracterização e Parâmetros

FURO: SR-03		
Classificação das rochas (Bienawski, 1989)		
Filito		
Início (m)		4,50
Fim (m)		10,50
Recuperação		60
RQD ("Rock Quality Designation")		10
Parâmetros		Pesos
Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	R0 (<1)	0
RQD ("Rock Quality Designation")	<20	3
Espaçamento das descontinuidades	<0,06	5
Condição das descontinuidades	Rugosa podre	20
Influência da água	Seco	15
Orientação das descontinuidades	Razoável	-25
Valor RMR		18
Classe		V
Índice GSI		13

Tabela 3.9: Estimativa dos parâmetros de resistência do maciço segundo a sua classe (Bieniawski, 1989).

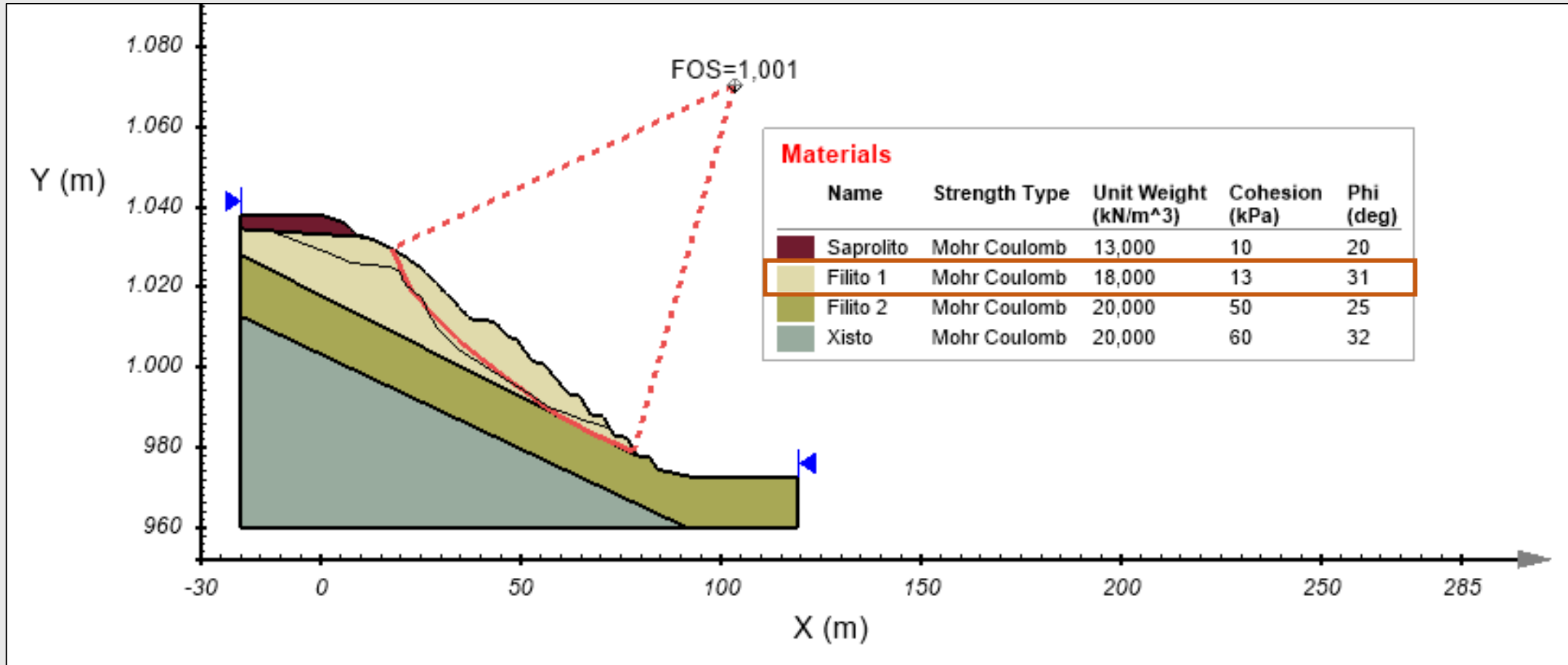
Classe do maciço	I	II	III	IV	V
Coesão da massa rochosa (kPa)	> 400	300 a 400	200 a 300	100 a 200	< 100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	> 45	35 a 45	25 a 35	15 a 25	< 15



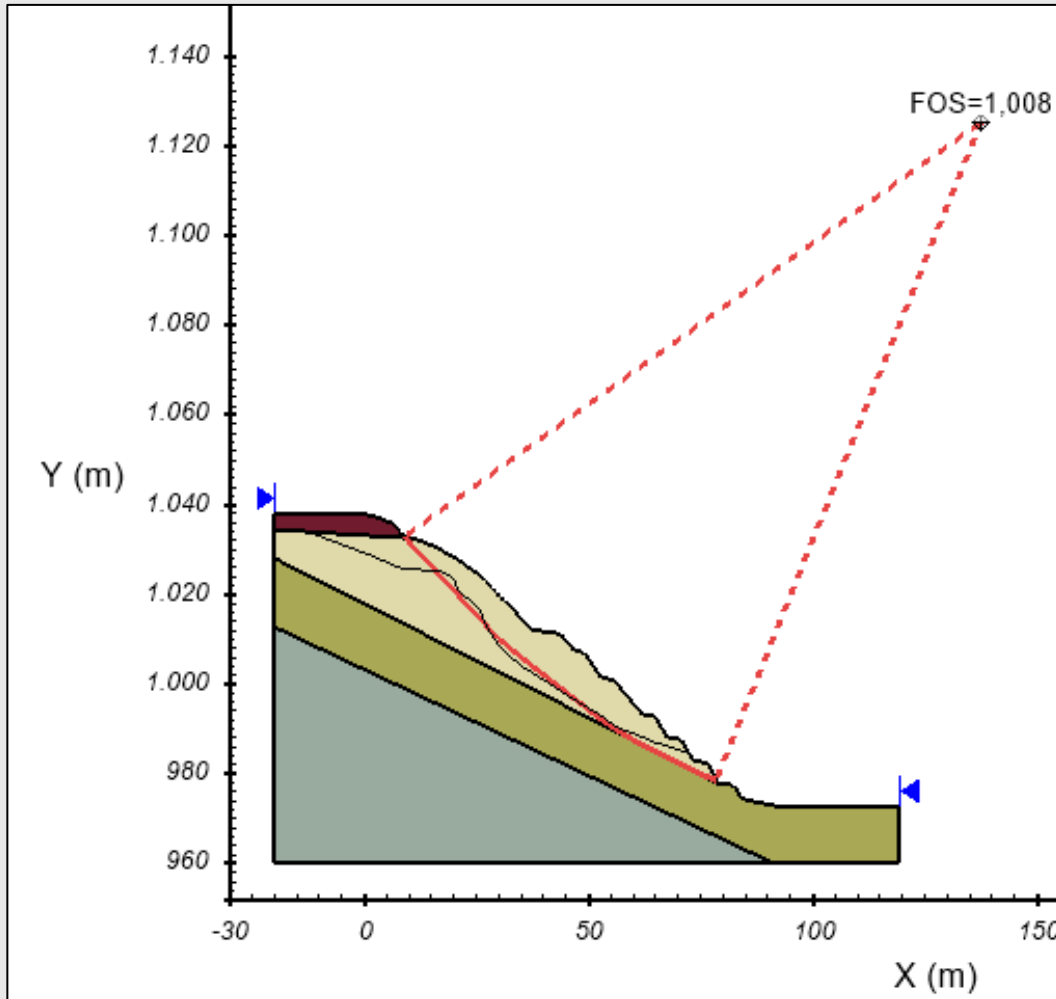
Metodologia – Análises

- ❖ Software: PLAXIS LE;
- ❖ Equilíbrio-Limite;
- ❖ Ruptura não circular em estado bidimensional;
- ❖ Métodos Morgenstern-Price e Spencer;
- ❖ Método de busca Cuckoo Search.

Resultados – Mohr Coulomb



Resultados – Anisotropic Strength

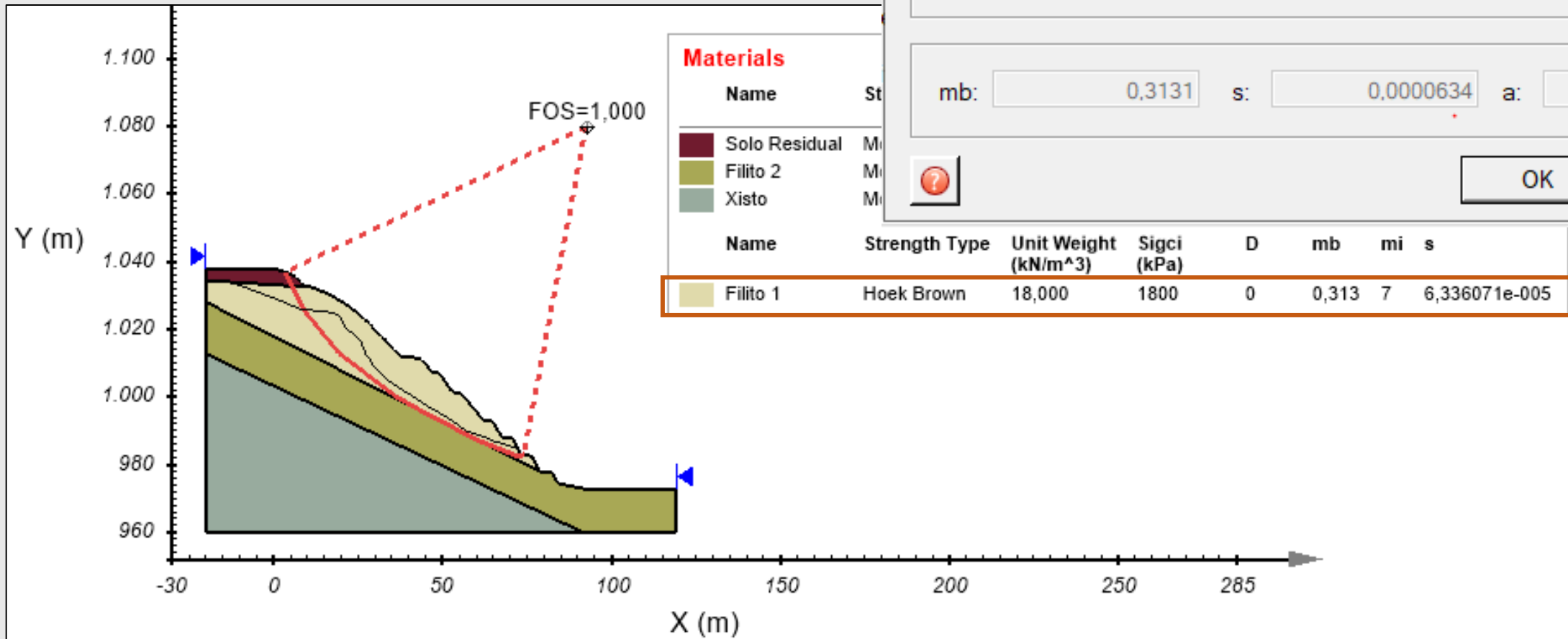


Materials

Name	Strength Type	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Phi (deg)
Solo Residual	Mohr Coulomb	13,000	10	20
Filito 2	Mohr Coulomb	20,000	60	35
Xisto	Mohr Coulomb	20,000	70	35

Name	Strength Type	Unit Weight (kN/m ³)	Cohesion 1 (kPa)	Cohesion 2 (kPa)	Phi 1 (deg)	Phi 2 (deg)	Angle (deg)
Filito 1	Anisotropic Strength	18,000	13	45	31	35	-40

Resultados – Hoek Brown



Compute Parameters from Geologic Strength Index

Intact Compressive Strength, Sigci: kPa

Geological Strength Index:

Intact Rock Constant, mi:

Disturbance Factor, D:

mb: s: a:

Discussões

Utilizando os 3 métodos foi possível chegar em uma ruptura que se aproxima da real com $FS=1$, mas o que foi possível interpretar?

- ❖ Hoek Brown apresentou superfície de ruptura mais côncava e profunda;
- ❖ Introduzindo os mesmos parâmetros para Mohr Coulomb e para o plano de maior fraqueza do Anisotropic Strength os resultados são similares; **POR QUE?**
- ❖ Ensaio triaxial de uma amostra local resultou em parâmetros de resistência mais elevados (cerca de 30 de coesão e 40 de ângulo de atrito);
- ❖ Direção dos planos de fraqueza é um dos principais fatores para a deflagração do movimento;
- ❖ Rochas brandas a muito brandas e maciço de baixa qualidade geomecânica;
- ❖ Ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais que levem em consideração a estruturação são imprescindíveis;
- ❖ Ensaios de Slake durability são importantes devido ao papel do intemperismo ao longo do tempo;

Considerações Finais

- ❖ Comparando 3 critérios de ruptura usando retroanálise para estudo de caso de deslizamento planar, Anisotropic Strength e Mohr Coulomb se mostraram os mais plausíveis para o cenário, mas Hoek Brown também foi capaz de representar com parâmetros realistas;
- ❖ A escolha do critério de ruptura que considere as particularidades e complexidades geológicas é uma das etapas mais importantes nos estudos de estabilidade de taludes, propiciando um entendimento mais robusto e informações mais fidedignas do cenário real;
- ❖ É imprescindível um plano de investigações adequado e a correta interpretação dos resultados;
- ❖ Um modelo não é e não pode ser uma imitação perfeita da realidade, e deve ser feita uma análise crítica usando esses modelos como **ferramentas**.
- ❖ Estudos da cava em 3D estão sendo desenvolvidos para aprimorar as comparações traçadas neste estudo.

Agradecimentos

- ❖ HIDROBR e equipe pela participação na elaboração do projeto e incentivo à capacitação e participação em eventos;
- ❖ Equipe da empresa para a qual o projeto de recuperação da cava foi desenvolvido pela disponibilização dos dados e incentivo à divulgação científica;

Bibliografia

- ❖ SILVA, E. M., M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do Quadrilátero Ferrífero. Orientador: Enivaldo Minette.
- ❖ Lopes MC (2006) Comportamento geotécnico e mecanismo de ruptura em rochas brandas—Mineração Córrego do Sítio. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral—Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p 94.
- ❖ DE ARAUJO, Thiago Peixoto, et al. Estudo da resistência de maciços de rocha branda em taludes de mineração. 2014.
- ❖ HUNT, R.E. (1984). Geotechnical Engineering Investigation Manual. McGraw-Hill, USA.983 p.
- ❖ SHEN, Jiayi; KARAKUS, Murat; XU, Chaoshui. Chart-based slope stability assessment using the Generalized Hoek–Brown criterion. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013, 64: 210-219.
- ❖ CHEN, Chao, et al. Hoek-Brown Failure Criterion-Based Creep Constitutive Model and BP Neural Network Parameter Inversion for Soft Surrounding Rock Mass of Tunnels. Applied Sciences, 2021, 11.21: 10033.

GEOTECNIA APLICADA À MINERAÇÃO

GEO MIN

1ST INTERNACIONAL CONFERENCE
ON GEOTECHNICS OF TAILINGS
AND MINE WASTE

2023

Patrocínio Diamante



Patrocínio Ouro



Patrocínio Prata



Apoio



Comercialização
e produção



Apoio Institucional



Realização

