



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



**MATHEUS SILVEIRA DE ALMEIDA**

**RETROANÁLISE DE RUPTURA GLOBAL DE UM TALUDE DE CAVA E ANÁLISE  
DE ESTABILIDADE DO TALUDE ATUAL EM UMA MINERAÇÃO DE FERRO**

**OURO PRETO - MG**  
**Março de 2023**

**MATHEUS SILVEIRA DE ALMEIDA**

**RETROANÁLISE DE RUPTURA GLOBAL DE UM TALUDE DE CAVA E ANÁLISE  
DE ESTABILIDADE DO TALUDE ATUAL EM UMA MINERAÇÃO DE FERRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Geotecnia Operacional

**Orientador:** Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos  
(*DEMIN/EM/UFOP*)

**OURO PRETO - MG**

**Março de 2023**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A447r Almeida, Matheus Silveira de.  
Retroanálise de ruptura global de um talude de cava e análise de estabilidade do talude atual em uma mineração de ferro. [manuscrito] / Matheus Silveira de Almeida. - 2023.  
72 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração. 2. Geotecnia. 3. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. I. Santos, Tatiana Barreto dos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.131.54

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Matheus Silveira de Almeida**

### **Retroanálise de ruptura global de um talude de cava e análise de estabilidade do talude atual em uma mineração de ferro**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 23 de março de 2023

#### Membros da banca

Dra Tatiana Barreto dos Santos - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr Hernani Mota de Lima - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos - Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos. orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/03/2023



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/03/2023, às 21:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0500813** e o código CRC **B9ADBBAD**.

## RESUMO

No processo da extração mineral, um dos papéis fundamentais é a atividade de lavra. Com o passar dos anos, o cenário tem ficado mais complexo, uma vez que o minério é considerado recurso natural, exaurível e não renovável. Desse modo, a ocorrência da sua escassez próxima a superfície está resultando em lavras com profundidades mais elevadas, exigindo técnicas mais robustas de exploração. Um talude pode ser uma inclinação qualquer, em um maciço rochoso ou em algum tipo de solo, podendo ser de origem natural ou artificial. Para chegar ao corpo de minério, utiliza-se taludes com maiores alturas de bancada e maiores ângulos de inclinação, permitindo uma menor remoção de estéril. Entretanto, este processo fragiliza a segurança geotécnica, devido às instabilidades dos taludes, as quais podem levar a rupturas locais ou até mesmo globais. Neste trabalho, foi analisado o rompimento global de um talude de uma cava de mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero, por meio de uma retroanálise. Posteriormente, a seção passou por um projeto de estabilização do talude, mediante a um retaludamento. Em seguida, foi realizada uma análise de estabilidade de segurança, a fim de compreender as condições atuais do talude. As análises de estabilidade foram feitas por meio do programa computacional Slide2 da Rocscience versão 9.020. Além disso, a empresa forneceu as geometrias necessárias para que as análises fossem realizadas, sendo uma do momento pré-ruptura (outubro/21) e outra do pós-retaludamento (setembro/22). Os resultados apresentados neste estudo chegaram nos parâmetros que ocasionou a ruptura e para as condições atuais, sinalizou que o retaludamento foi ineficiente, uma vez que a estrutura não atingiu os parâmetros de segurança de estabilidade, desta forma, foram sugeridas propostas para a estabilização do talude dessa cava.

**Palavras-chave:** mineração, talude, geotecnia, retaludamento, retroanálise.

## ABSTRACT

In the process of mineral heritage, one of the fundamental roles is the mining activity. Over the years, the scenario has become more complex, since ore is considered a natural, exhaustive and non-renewable resource. Thus, the occurrence of its scarcity close to the surface is generated in mines with greater depths, more robust exploration techniques. A slope can be any slope, in a rocky mass or in some type of soil, and can be of natural or artificial origin. To reach the processing body, slopes with greater bench heights and greater inclination angles are used, allowing less waste removal. However, this process weakens geotechnical safety, due to slope instabilities, which can lead to local or even global ruptures. In this work, the global collapse of a slope of an iron mining pit in the Cuadrilátero Ferrífero was analyzed through a retroanalysis. Subsequently, the section underwent a slope stabilization project, through re-sloping. Then, a safety stability analysis was performed in order to understand the current conditions of the slope. Stability analyzes were performed using Rocscience's Slide2 computational program, version 9.020. In addition, the company provided the necessary geometries for the analyzes to be carried out, one of the pre-rupture moment (October/21) and the other of the post-retaluding (September/22). The results presented in this study arrived at the parameters that caused the failure and for the current conditions, signaled that the re-sloping was inefficient, since the structure did not feed the stability safety parameters, in this way, proposals were suggested for the stabilization of the slope of this pit.

**Keywords:** mining, slope, geotechnics, resurfacing, back analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Critério de escoamento de Mohr-Coulomb no plano ( $\sigma$ , $\tau$ ) .....	20
Figura 2: Determinação do valor de GSI.....	22
Figura 3: Estimativa de GSI para maciços rochosos heterogêneos .....	23
Figura 4: Sinais de ocorrência de rastejo.....	27
Figura 5: Escorregamento circular .....	28
Figura 6: Um plano de fraqueza .....	29
Figura 7: Dois planos de fraqueza, gerando uma cunha.....	29
Figura 8: Rolamento de blocos.....	30
Figura 9: Tombamento de blocos .....	30
Figura 10: Esquematização de um empreendimento mineiro .....	32
Figura 11: Modelo de instrumentação em taludes.....	33
Figura 12: Método das Fatias .....	36
Figura 13: Forças atuantes em cada fatia.....	36
Figura 14: Forças aplicadas em uma fatia pelo método de Morgenstern & Price (1965) .....	38
Figura 15: Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer (1967).....	39
Figura 16: Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967) .....	41
Figura 17 - Localização da cidade de Ouro Preto, MG. ....	42
Figura 18: Vista geral da Cava Um .....	43
Figura 19: Cava setorizada por paredes 1, 2, 3 e 4.....	44
Figura 20: Vista aérea da Cava Um.....	45
Figura 21: Amostra de filito .....	45
Figura 22: Surgimento da trinca.....	46
Figura 23: Instalação dos prismas de monitoramento .....	47
Figura 24: Prisma MTA_07 instalado na segunda berma .....	47
Figura 25: Comportamento horizontal, vertical e deslocamento total dos prismas.....	48
Figura 26: Pluviometria referente ao período chuvoso de 2021/22.....	49
Figura 27: Ruptura global na parede 2 .....	50
Figura 28: Projeto em fase final .....	51
Figura 29: Localização dos novos prismas de monitoramento.....	52
Figura 30: Comportamento horizontal, vertical e deslocamento total dos prismas novos .....	52
Figura 31: Tipo de material e seus parâmetros de resistência .....	53
Figura 32: Seção EE' .....	54

Figura 33: Perfil topográfico referente a topografia pré ruptura .....	54
Figura 34: Perfil topográfico referente a topografia pós retaludamento .....	54
Figura 35: Parâmetros inferidos para análise .....	55
Figura 36: Resultados da primeira análise, seguindo parâmetros fornecidos pela empresa.....	58
Figura 37: Resultados da segunda análise, seguindo os parâmetros inferidos 1 .....	59
Figura 38: Resultados da terceira análise, seguindo os parâmetros inferidos 2 .....	60
Figura 39: Resultados da primeira análise, seguindo parâmetros fornecidos pela empresa.....	63
Figura 40: Resultados da segunda análise, seguindo os parâmetros inferidos 1 .....	64
Figura 41: Resultados da terceira análise, seguindo os parâmetros inferidos 2 .....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistema de classificação RQD .....	17
Tabela 2: Sistema de classificação geomecânica ponderada RMR – Pesos .....	17
Tabela 3: Ajuste para orientação de descontinuidades .....	18
Tabela 4: Orientações para escolha do valor D .....	24
Tabela 5: Classificação de movimentos de massa, segundo Varnes (1978) .....	25
Tabela 6: Classificação de movimento de massa segundo Augusto Filho (1992) .....	26
Tabela 7: Classificação de corrida, baseado na composição do material. ....	31
Tabela 8: Fatores de segurança mínimo exigidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009) .....	35
Tabela 9: Parâmetros de resistência das análises e resultado do fator de segurança.....	56
Tabela 10: Parâmetros de resistência das análises e resultado do fator de segurança.....	61

## LISTA DE SIGLAS

ANM: Agência Nacional de Mineração

FL: Filito

FS: Fator de segurança

GSI: *Geological Strength Index*

HAR: Hematitito Argiloso

HC: Hematitito Compacto

HF: Hematitito Friável

IAR: Itabirito Argiloso

IC: Itabirito Compacto

IF: Itabirito Friável

IFR: Itabirito Friável Rico

IQR: índice de qualidade da rocha

LT: Laterita

NBR: Norma brasileira

RO: Rolado

RMR: *Rock Mass Rating*

RQD: *Rock Quality Designation*

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.OBJETIVOS .....</b>	<b>14</b>
2.1. OBJETIVOS GERAIS .....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
3.1.MACIÇOS ROCHOSOS.....	15
3.2.CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO .....	16
3.3.CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA MACIÇOS ROCHOSOS .....	19
3.3.1.MOHR-COULOMB .....	19
3.3.2.HOEK-BROWN GENERALIZADO.....	20
3.4.MOVIMENTO DE MASSA E TIPOS DE RUPTURA.....	24
3.4.1.RASTEJO .....	26
3.4.2.ESCORREGAMENTO .....	27
3.4.3.QUEDA .....	30
3.4.4.CORRIDA .....	31
3.5.CONCEITOS BÁSICOS E TERMINOLOGIAS APLICADAS A MINERAÇÃO.....	32
3.5.1.MONITORAMENTO DE TALUDES DE MINERAÇÃO .....	33
3.6.ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES.....	34
3.6.1.FATOR DE SEGURANÇA .....	34
3.6.2.MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE.....	35
3.6.2.1.MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE POR MORGENSTERN & PRICE.....	37
3.6.2.2.MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE POR SPENCER.....	39
<b>4.ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>42</b>
4.1.CAVA UM .....	43
4.2.PAREDE 2.....	44

4.2.1.INSPEÇÕES NOS TALUDES E BERMAS DA PAREDE 2 .....	46
4.2.2.SURGIMENTO DA TRINCA .....	46
4.2.3.MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO .....	46
4.2.4.RUPTURA CIRCULAR GLOBAL .....	48
4.2.5.RETALUDAMENTO .....	50
<b>5.METODOLOGIA.....</b>	<b>53</b>
<b>6.RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
6.1.ANÁLISE DE FS - RETROANÁLISE.....	56
6.2.ANÁLISES DE FS – PÓS RETALUDAMENTO .....	61
6.3.MONITORAMENTO PARA O PÓS RETALUDAMENTO.....	66
<b>7.CONCLUSÃO.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>69</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade de lavra assume uma considerável importância na evolução do processo da mineração. Classificada como atividade operacional, o processo de exploração do minério, pode ocorrer de diversas maneiras e várias frentes de lavra.

Com o passar dos anos, o cenário tem ficado ainda mais complexo, uma vez que o minério é considerado recurso natural, exaurível e não renovável. A escassez de sua ocorrência perto da superfície está resultando em lavras com profundidades cada vez mais elevadas, exigindo robustez em técnicas de exploração, para a garantia da funcionalidade do empreendimento mineiro. Para chegar ao corpo de minério, busca-se a execução de taludes com maiores alturas e ângulos de inclinação, o que permite uma menor remoção de estéril e contribui com a economia do projeto. Entretanto, este processo fragiliza a segurança geotécnica, devido as instabilidades dos taludes que, dependendo da situação, pode provocar rupturas locais ou até mesmo globais (PARRA, *et al.*, 2017).

Um talude pode ser definido por uma inclinação qualquer, em um maciço rochoso ou em algum tipo de solo. Ele pode ser natural, também denominado encosta, o qual é formado pela natureza devido ações geológicas ou a partir da ação das intempéries, como chuva, sol e vento, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes, que são considerados taludes artificiais (GEORSCOVICH, 2012, p. 13).

Para todo e qualquer ambiente de trabalho, é necessário a garantia de segurança para todos os colaboradores, maquinário, fauna e flora. Em um empreendimento mineiro, não é diferente. A estabilidade dos taludes é primordial para a garantia da integridade física de todos. Para que tenha certeza de estabilidade, os engenheiros geotécnicos precisam verificar o fator de segurança dos taludes da área de mina, tanto nas cavas, nas pilhas de estéril e de rejeito quanto nos taludes do entorno, como por exemplo os taludes que cercam as áreas administrativas, dos refeitórios ou até mesmo as que margeiam rodovias.

Apesar dos estudos e análises de estabilidade dos taludes, eventualmente acontece algum tipo de desestabilização, podendo ocasionar ruptura. O desmonte de material por explosivos, pode ser considerado um fator condicionante de ruptura, devido gerar sismicidade no terreno, podendo causar rompimento de uma berma ou escorregamento de face de talude ou até mesmo uma ruptura global. Existem estudos para determinar as causas do rompimento de um talude. Um desses, é a retroanálise. Uma abordagem utilizada na geotecnia que corrobora para estimar as propriedades de resistência e deformabilidade de matrizes rochosas e/ou solo

(FERNANDES, *et al.*, 2019). De acordo com Borchardt (2012), as análises realizadas em taludes após uma ocorrência de ruptura são métodos de retroanálise.

No presente trabalho, analisou-se o rompimento global de um talude de uma cava de mineração de ferro no Quadrilátero Ferrífero, por meio de uma retroanálise. Posteriormente, a seção passou por um projeto de estabilização do talude, mediante a um retaludamento. Por fim, foi realizada uma análise de estabilidade de segurança, a fim de compreender as condições atuais do talude.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo do presente trabalho é realizar uma retroanálise de uma ruptura global em um talude de uma cava de minério de ferro e determinar análises de estabilidade deste talude após uma seção de retaludamento do mesmo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1) Retroanálise de ruptura global em um talude de cava de minério de ferro;
- 2) Análise de estabilidade após retaludamento do talude;
- 3) Avaliação de estabilidade do talude atual;
- 4) Análise de dados de monitoramento topográfico e visual para o talude retaludado.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos aspectos relevantes relacionados a análises de estabilidade, que possuem a finalidade de garantir a segurança de estabilidade em taludes de uma mina e possibilitar as operações unitárias subsequentes em um empreendimento mineiro.

#### 3.1. MACIÇOS ROCHOSOS

Maciço rochoso é composto por um conjunto de rochas justapostas e articuladas, que contém material resultante de processos geológicos, em que muitas vezes são denominados como rocha intacta, termo que, em algumas ocasiões podem ser classificados erroneamente, uma vez que o material constituinte possa apresentar alterações em sua composição (AZEVEDO & MARQUES, 2006). Certamente, a definição de rocha se dá por meio de um corpo sólido natural formado por minerais resultantes de processos geológicos em que sofreram alterações por fatores como a pressão e temperatura (MESQUITA, 2008). Esse conjunto de rocha possui propriedades características, sendo elas físicas, químicas ou mecânicas, como por exemplo: densidade, porosidade, coesão, dureza, resistência mecânica, módulo de elasticidade, etc. (SILVA, 2019).

Por sua vez, a descontinuidade é considerada como um plano de fraqueza na rocha, resultante da quebra da resistência da rocha relacionada à tração e ao cisalhamento (zonas de cisalhamento). A descontinuidade pode aparecer em diversas formas, como falhas, juntas, fendas de tração, dentre outras. E podem ocorrer em várias escalas, variando desde microfissuras até falhas de extensão regional (JAQUES, 2014). Ao se tratar da influência das descontinuidades no maciço rochoso, deve-se levar em consideração fatores tais como natureza da descontinuidade, abertura, espaçamento, frequência, orientação, rugosidade, persistência ou extensão, grau de alteração e presença de água nas descontinuidades (FIORI, 2015).

Portanto, as características de um maciço diferem-se de ambiente para ambiente, portanto, deve-se realizar a classificação geológica deste material, para poder entender o comportamento naquele local. Uma das formas de compreender a classificação geológica de um maciço rochoso, são por meio de análises dos parâmetros de resistência do material constituinte da rocha.

### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

A primeira proposta de classificação dos maciços rochosos foi apresentada por Ritter (1879), para aplicações em construções de túneis. Posteriormente, foram apresentados vários sistemas por Terzaghi, Lauffer, Deer, Hoek, Palmstrom, Bieniawski, entre outros. Sendo que, esses sistemas têm por finalidade, representar os aspectos qualitativos. Já as outras propostas, procuram quantificar alguns parâmetros mecânicos do maciço (QUEIROZ, 2016, p. 211).

Cada sistema de classificação dos maciços possui limitações referentes à utilização dos parâmetros estimados, podendo não apresentar resultados precisos. Os principais sistemas de classificação são: classificação litológica, classificação de Terzaghi, classificação pelo estado de alteração das rochas, classificação pelo grau de fraturamento e classificação pelo Rock Quality Designation (RQD) ou índice de qualidade da rocha (IQR) (OLIVEIRA, B. P & PELAQUIM, F. G. P., 2021).

A classificação de Terzaghi (1946), foi estabelecida com o propósito de entender o comportamento das rochas para construção de túneis. Já a classificação pelo grau de fraturamento, foi determinada para os maciços rochosos que podem apresentar fraturas em determinados graus e direção. As classificações modernas, baseiam-se no parâmetro RQD, que foi proposto com a finalidade de englobar os critérios de fraturamento e estado de alteração do maciço em uma única classificação (OLIVEIRA, B. P & PELAQUIM, F. G. P., 2021).

O parâmetro RQD, se dá por meio da recuperação de testemunhos de sondagem e a medição do comprimento médio de cada segmento de rocha maior ou igual a 10 cm (QUEIROZ, 2016). O cálculo é feito através da Equação 1, referindo a porcentagem obtida pela divisão da soma dos comprimentos dos segmentos do testemunho pelo comprimento total do furo.

$$RQD = 100 * \sum_{i=1}^{i=n} \frac{Xi}{L} \quad (1)$$

Onde:

$X_i$  é o comprimento individual dos fragmentos de testemunho superiores a 10 cm

$L$  é o comprimento total do testemunho

O valor resultante do RQD, gera uma classificação do maciço rochoso, apresentada na Tabela 1. Porém, segundo FIORI (2015), apenas esses valores em porcentagem do RQD, não

são suficientes para a caracterização de um maciço rochoso. Desse modo, faz necessário a utilização de outros parâmetros relacionados a descontinuidade presente no material.

Tabela 1: Sistema de classificação RQD

Valores do RQD (%)	Descrição do Maciço
100 – 91	Excelente qualidade
90 – 75	Boa qualidade
75 – 50	Médio ou regular
50 – 25	Fraco ou obre
< 25	Muito fraco ou muito pobre

Fonte: adaptado de Queiroz (2016, p. 219)

Bieniawski (1976, 1989), propôs a classificação geomecânica *Rock Mass Rating* (RMR), que leva em consideração a resistência uniaxial da rocha intacta, espaçamento entre fraturas, condições físicas e geométricas e a presença de água (FIORI, 2015). A aplicação da classificação a um maciço rochoso resulta a divisão deste em várias regiões estruturais (zonas) a serem classificadas separadamente. A Tabela 2, permite determinar o peso relativo às características do material.

Tabela 2: Sistema de classificação geomecânica ponderada RMR – Pesos

Parâmetros de classificação e pesos relativos									
1	Resistência da rocha intacta	Índice de compressão puntiforme (Mpa)	10	10-4	4-2	2-1	Ensaio de compressão uniaxial preferido (kg/cm <sup>2</sup> )		
		Resistência à compressão simples (Mpa)	250	250-100	100-50	50-25	25-15 Mpa	15-1 Mpa	1 Mpa
	Peso relativo	15	12	7	4	2	1	0	
2	IQR (%)	100-90	90-75	75-50	50-25	< 25			
	Peso relativo	20	17	13	8	3			
3	Espaçamento de juntas	>2m	2 - 0,6m	600 – 200 mm	200 – 60 mm	< 60 mm			
	Peso relativo	30	25	10	8	5			

4	Condição das juntas		Superfícies muito rugosas, descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de juntas 1-5 mm, juntas contínuas	Preenchimento mole de 5 mm ou abertura de juntas > 5 mm. Juntas contínuas
	Peso relativo		30	25	20	10	0
5	Água subterrânea	Infiltrações em 10m de túnel	Nenhuma	< 1,0 l/min	< 25,0 l/min	25- 125 l/min	>125 l/min
		Razão: pressão d'água na junta por tensão principal máxima	0	0	0,2-0,1	0,5-0,2	>0,5
		Condições gerais	Completamente seca		Umidade (água intersticial)	Pressão de água moderada	Problemas graves d'água
	Peso relativo		10		7	4	0

Fonte: adaptado de Fiori (2015, p. 435)

A soma desses pontos (1 a 5), resulta no RMR básico, classificando os maciços rochosos desde muito bons até muito pobres, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3: Ajuste para orientação de descontinuidades

Classe de maciços					
Classe do maciço	I	II	III	IV	V
Condição geral	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre
Somatório dos pesos (Fator RMR)	100 <- 80	80 <- 61	60 <- 41	40 <- 21	<20
Significado das classes					
Classe número	I	II	III	IV	V
Coesão	>400 KPa	300 – 400 KPa	300 – 200 KPa	200 – 100 KPa	< 100 KPa
Ângulo de atrito	>45°	45°-35°	35°-25°	25°-15°	<15°

Fonte: adaptado de Fiori (2015, p. 436)

### 3.3. CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA PARA MACIÇOS ROCHOSOS

Os critérios de resistência de maciços rochosos servem para determinar as funções de tensão que define o nível máximo de tensão que um corpo, deformável ou não, pode suportar sem romper. Eles são um fator de interesse da engenharia geotécnica, devido apresentarem informações fundamentais para determinar o fator de segurança (FS) de uma área, e, poder conhecer as propriedades de ruptura para que seja possível prever quando ela ocorrerá (HUDSON, J. A. & HARRISON, J. P., 2000).

Segundo Pinto (2000), os critérios de resistência são formulações que procuram refletir as condições em termos de tensões em que ocorre a ruptura dos materiais. Na geomecânica, quando se fala em mecânica das rochas, faz-se necessário entendimento de critérios de resistência como o de Mohr-Coulomb e Hoek-Brown, uma vez que são os mais comuns de serem utilizados.

#### 3.3.1. MOHR-COULOMB

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi inicialmente proposto por Coulomb (1773), visto que, supõe que um material rompe quando a tensão cisalhante num determinado plano de um ponto atinge sua resistência ao cisalhamento, a qual apresenta duas parcelas uma devida a coesão e outra ao ângulo de atrito. A envoltória é comumente curva, embora possa ser satisfatoriamente ajustada por uma reta no intervalo de tensões normais de interesse. A equação (2) corresponde ao critério de resistência proposto por Coulomb.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

Onde:

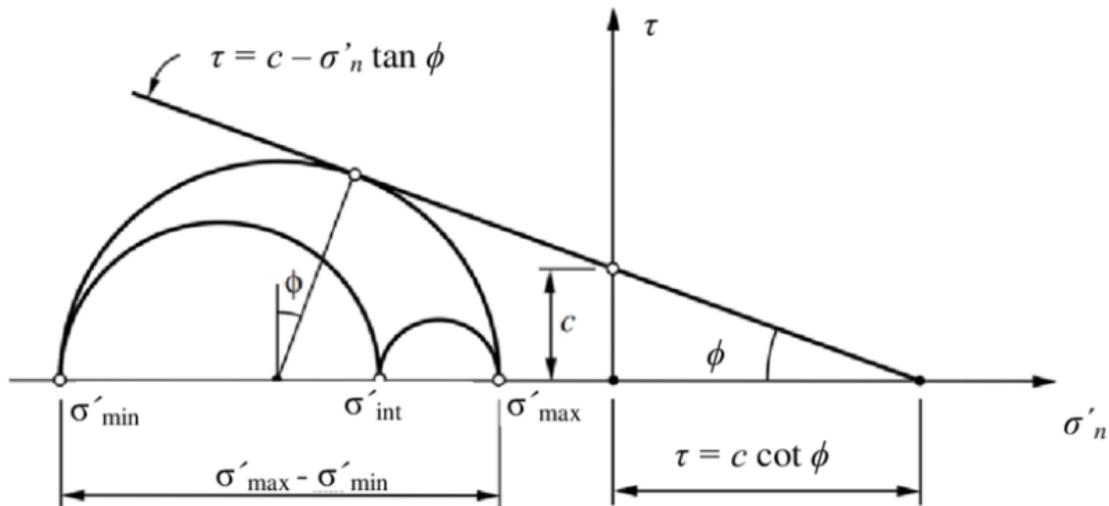
$\tau$  é a resistência ao cisalhamento

$c$  é a coesão

$\sigma$  é a tensão normal máxima aplicada

$\varphi$  é o ângulo de atrito

A Figura 1, indica o estado de tensões, considerando o critério de resistência de Mohr-Coulomb.

Figura 1: Critério de escoamento de Mohr-Coulomb no plano ( $\sigma$ ,  $\tau$ )

Fonte: adaptado de CORDERO (2013)

O conceito do círculo de Mohr-Coloumb descreve a função de resistência em termos das tensões principais  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ . Assim, temos que:

$$\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \sin \varphi + c \cos \varphi \quad (3)$$

Assim, com base no critério de Mohr, pode-se definir que a tensão de falha sob compressão é maior do que sob tração.

### 3.3.2. HOEK-BROWN GENERALIZADO

Para a análise de taludes em rocha é necessário um critério que seja capaz de representar a resistência do maciço rochoso de forma apropriada. Em 1980, Hoek e Brown colocaram em tentativa prover dados de entrada para análises requeridas em um projeto de escavações subterrâneas em rocha competente. Esse critério foi criado com base em resultados de pesquisas sobre ruptura frágil de rocha intacta. Ele introduz fatores que reduzem estas propriedades com base nas características das descontinuidades no maciço rochoso. Ao longo do tempo, o critério passou por mudanças até chegar na proposta de ruptura de Hoek-Brown Generalizado (HOEK, *et al.*, 2002). O critério proposto em 2002, foi desenvolvido para maciços rochosos e descreve uma relação linear no espaço das tensões principais como:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

Onde,

$\sigma_1$  é a tensão principal efetiva máxima

$\sigma_3$  é a tensão principal mínima

$\sigma_{ci}$  é a resistência da rocha intacta à compressão simples

$m_b$  é o valor reduzido da constante do material  $m_i$  ou constante do maciço rochoso

$a, s$  são coeficientes de dependência constantes para o maciço rochoso

Hoek (1994), apresentou um sistema de classificação denominado por GSI (*Geological Strength Index*) (Figura 2 e 3), que fornece um parâmetro geotécnico que varia entre 0 e 100. Dessa maneira, este sistema baseia-se no conceito de que a resistência de um maciço rochoso necessita de propriedades da rocha intacta e das características das descontinuidades.



Figura 3: Estimativa de GSI para maciços rochosos heterogêneos

GSI PARA MACIÇOS ROCHOSOS HETEROGÊNEOS TAIS COMO FLYSCH (Marinos, P. & Hoek, E., 2000) A partir de uma descrição da litologia, estrutura e condições da superfície (particularmente de planos de acamamentos), escolha uma caixa de desenho. Localize a posição na caixa que corresponde à condição das descontinuidades e estime o valor médio de GSI a partir dos contornos. Não tente ser tão preciso. Citar um alcance de 33 a 37 é mais realístico do que afirmar que GSI = 35. Observe que o Critério de Hoek-Brown não é aplicável a rupturas controladas estruturalmente. Onde descontinuidades persistentes planares fracas orientadas desfavoravelmente estão presentes, estas controlarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência de alguns maciços rochosos é reduzida pela presença de água subterrânea, e isto pode ser levado em conta através de um leve deslocamento para a direita nas colunas para condições razoável, pobre e muito pobre. Pressão de água não muda o valor de GSI, e é avaliada através do uso de análises de tensão efetiva.		CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE DE DESCONTINUIDADES (Predominantemente planos de acamamento)				
COMPOSIÇÃO E ESTRUTURA		MUITO BOA – Muito rugosa, superfícies são raramente interpenetradas	BOA – Rugosa, superfícies levemente interpenetradas	RAZOÁVEL – Lisa, superfícies moderadamente interpenetradas e alteradas	POBRE – Muito lisa, superfícies ocasionalmente polidas com camadas compactas ou preenchidas com fragmentos angulares	MUITO POBRE – Muito lisa, superfícies polidas ou altamente interpenetradas com camadas de argila mole ou preenchimentos
	<b>A.</b> Acumamento espesso, arenito muito fraturado. O efeito de camadas de póreo sobre os planos de acumamento é minimizado pelo confinamento do maciço rochoso. Em túneis rasos ou taludes estes planos de acumamento podem causar instabilidade controlada estruturalmente.	70	60	A		
	<b>B.</b> Arenito com finas camadas de siltito intercaladas			B		
	<b>C.</b> Arenito e siltito em quantidades iguais			C		
	<b>D.</b> Siltito ou xisto (folhado) siltoso com camadas de arenito			D		
	<b>E.</b> Siltito fraco ou xisto (folhado) argiloso com camadas de arenito			E		
	<b>F.</b> Deformado tectonicamente, intensamente dobrado/falhado, xisto (folhado) argiloso ou siltito cisalhados, com camadas de arenitos quebradas e deformadas formando uma estrutura quase cadáver.					
	<b>G.</b> Xisto (folhado) siltoso ou argiloso não perturbado com ou sem algumas camadas de arenitos muito finas.					
	<b>H.</b> Xisto (folhado) siltoso ou argiloso deformado tectonicamente, formando uma estrutura cadáver com bolsões de argila. Camadas finas de arenito são transformadas em pequenos pedaços de rochas.					
C, D, E e G – podem ser mais ou menos dobrados do que a ilustração, mas isto não muda a resistência. Deformação tectônica, falhamento e perda de continuidade movem estas categorias para F e H.						
→ Significa deformação devido à perturbação tectônica						

Fonte: Adaptado de Marinos *et al.* (2005)

Os parâmetros  $m_b$ ,  $s$  e  $a$  são calculados por meio da Equação 5, 6 e 7.

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (5)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left( e^{\left(-\frac{GSI}{15}\right)} - e^{\left(-\frac{20}{3}\right)} \right) \quad (7)$$

Onde,

$m_i$  é a constante da rocha intacta

GSI é o índice de resistência geológica

D é o fator de perturbação

Os valores do fator de perturbação (D), estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Orientações para escolha do valor D

Descrição do maciço rochoso	Valores sugeridos para D
Para detonações em pequena escala em taludes resultam danos ao maciço rochoso, mesmo com controle do desmonte. O alívio de tensão provoca alguma perturbação	0,7 Desmonte bom
	1 Desmonte ruim
Para encostas muito grandes de minas a céu aberto que sofrem perturbações significativas devido à detonação de produção pesada e ao alívio de tensão da remoção de sobrecarga	1 Desmonte de produção
Para rochas mais moles a escavação pode ser realizada a partir do desmonte mecânico, resultando em menores danos a encosta	0,7 Desmonte mecânico

Fonte: Adaptado de Hoek *et al.* (2002)

Se o maciço rochoso for classificado por ser de má qualidade, o valor do GSI pode ser estimado através do valor do RMR, adota-se um peso de 15 para a condição da presença da água e de 0 para a orientação das descontinuidades. Dessa forma, para maciços com  $RMR > 23$ , a relação entre estes dois índices faz-se através da equação 6.

$$GSI = RMR - 5 \quad (8)$$

### 3.4. MOVIMENTO DE MASSA E TIPOS DE RUPTURA

Diversas obras de engenharia são projetadas em terrenos naturais, ficando sujeitas a problemas de estabilização. A instabilidade pode ser causada por mudanças de topografia, alterações sísmicas, variação da poropressão e imposição de carregamentos externos. Com isso, estes agentes causadores, podem ocasionar mudanças na tensão cisalhante, os quais são capazes de superar as tensões resistentes, resultando na ruptura do talude (PEREIRA, 2021).

Os movimentos de massa, são definidos pelo movimento de descida de solos e/ou rochas em superfícies inclinadas sob efeito da gravidade e pode ser potencializado pela ação da água. Esta movimentação pode ser classificada de acordo com a velocidade de deslocamento do material e tem relação com a profundidade da ruptura.

Existem algumas propostas para classificar a movimentação de massa, destaca-se a proposta de Varnes (1978), comumente utilizada por pesquisadores ao redor do mundo e considerada oficial pela *International Association of Engineering Geology and the Environment* – IAEG (Associação Internacional de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente). A proposta de Varnes (1978), representada na Tabela 5, traz o tipo de material e a maneira em que se move.

Tabela 5: Classificação de movimentos de massa, segundo Varnes (1978)

Tipo de Movimento			Tipo de Material		
			Rocha	Solos de engenharia	
				Grosso	Fino
Quedas			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de solo
Tombamentos			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de solo
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de solo
	Translacional		Escorregamento de blocos rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamento de solo
		Muitas unidades			
Expansões laterais			Espalhamento de rocha	Espalhamento de detritos	Espalhamento de solo
Corridas/escoamentos			Corrida de rocha (rastejo profundo)	Corrida de detritos	Corrida de solo
				(Rastejo de solo)	

Fonte: Adaptado de Varnes (1978)

A classificação de Varnes (1978), não deixa claro os tipos de detritos ou qual seria o tipo de solo. Além disso, não define as condições para todos os climas, sendo que para cada ambiente existe uma geologia que é variável de acordo com as condições climáticas. Dessa forma, Augusto Filho (1992) adaptou a classificação proposta por Varnes (1978) para as condições ambientais do Brasil, que é composta em grande maioria por solos tropicais e estão representados na Tabela 6.

Tabela 6: Classificação de movimento de massa segundo Augusto Filho (1992)

Processos	Características do movimento, material e geometria
Rastejo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vários planos de deslocamento (internos)</li> <li>• Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>• Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</li> <li>• Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</li> <li>• Geometria indefinida</li> </ul>
Escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>• Velocidades médias (km/h) a altas (m/s)</li> <li>• Pequenos a grandes volumes de material</li> <li>• Geometria e materiais variáveis</li> <li>• Planares → Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza</li> <li>• Circulares → Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturados</li> <li>• Em cunhas → Solos e rochas com dois planos de fraqueza</li> <li>• Sem planos de deslocamento</li> </ul>
Queda	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</li> <li>• Velocidades muito altas (m/s)</li> <li>• Material rochoso</li> <li>• Pequenos a médios volumes</li> <li>• Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.</li> <li>• Rolamento de matacão</li> <li>• Tombamento</li> </ul>
Corrida	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)</li> <li>• Movimento semelhante ao de um líquido viscoso</li> <li>• Desenvolvimento ao longo das drenagens</li> <li>• Velocidades médias a altas</li> <li>• Mobilização de solo, rocha, detritos e água</li> <li>• Grandes volumes de material</li> <li>• Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Augusto Filho (1992)

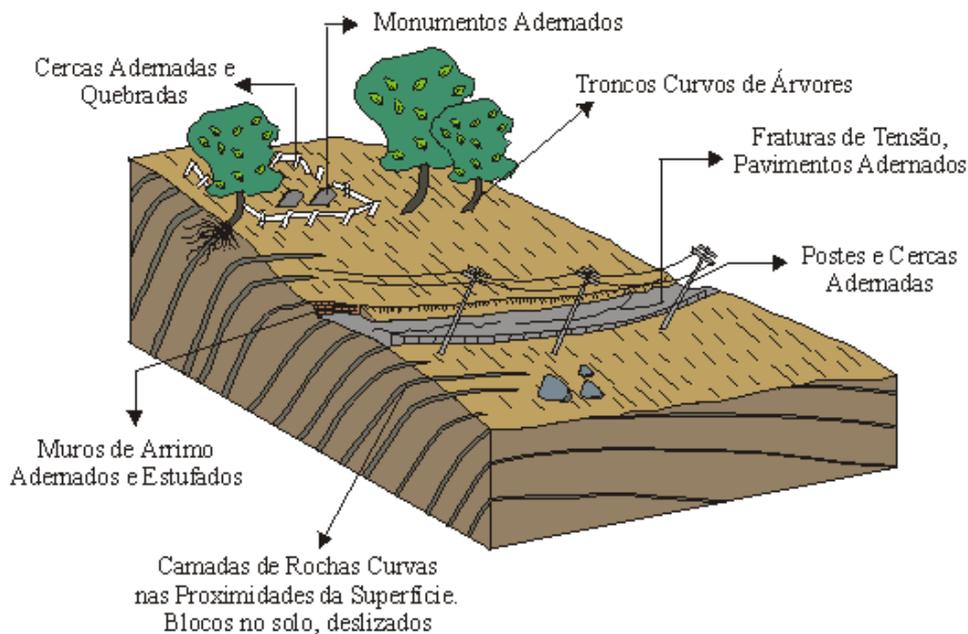
### 3.4.1. RASTEJO

O movimento de rastejo é resultante do deslocamento lento de solos ou rochas, na ordem de grandeza de milímetros a centímetros por ano. Ocorrem geralmente em horizontes superficiais de solo e de transição solo/rocha, como também em rochas alteradas e fraturadas (BORCHARDT, 2012).

Segundo Highland e Bobrowsky (2008), o rastejo é causado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas. Terzaghi (1950) dividiu o movimento de rastejo em dois tipos: rastejo sazonal, no qual o movimento é variável de acordo com a sazonalidade e ocorre no interior e no fundo do solo. E contínuo, devido a tensão de cisalhamento sobressair a resistência do material, gerando movimentação a favor da gravidade, mas sem muita variação ao longo do ano.

A partir de uma inspeção visual, pode ser identificada a ocorrência do rastejo, através do encurvamento de árvores, postes e cercas, fraturamento da superfície do solo e de pavimentos, além do "embarrigamento" de muros de arrimo (INFANTI JR. & FORNASARI FILHO, 1998). De acordo com Queiroz (2016), o rastejo pode ser caracterizado como um indicativo de instabilidade, principalmente pela ação do intemperismo, de maneira que atinja o equilíbrio limite e ocasionando uma ruptura rápida, como o escorregamento de material (Figura 4).

Figura 4: Sinais de ocorrência de rastejo.



Fonte: Adaptado de Reis (2021)

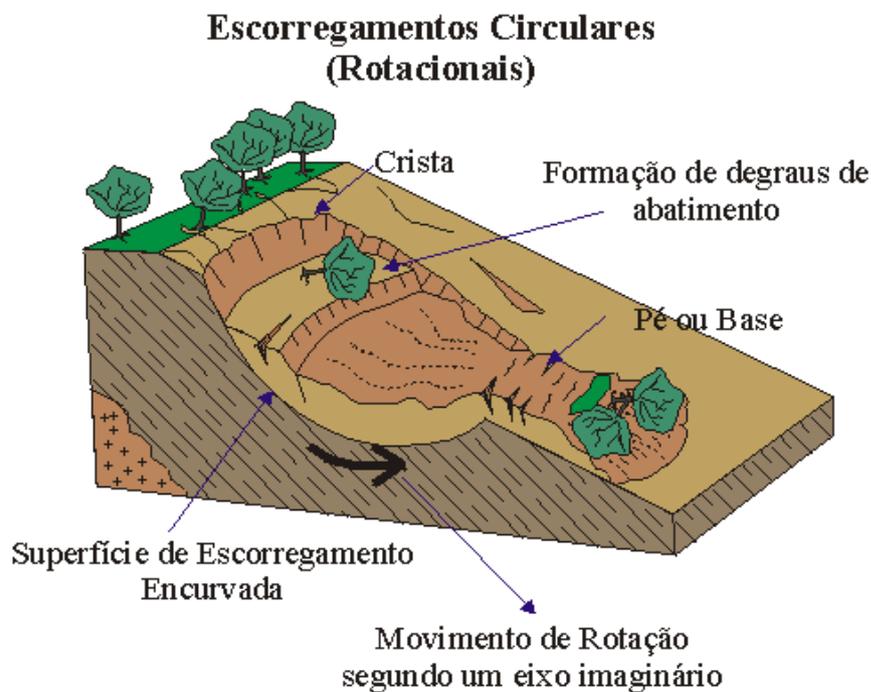
### 3.4.2. ESCORREGAMENTO

O escorregamento é definido por movimentações rápidas e com superfície bem definida, de maneira que a ação da gravidade desloca para baixo e para fora do talude, deixando perceptível o volume movimentado. O processo de escorregamento está associado à ruptura de

cisalhamento, quando as tensões cisalhantes solicitantes ultrapassam as tensões cisalhantes resistentes, em um período muito curto. Os escorregamentos podem ser divididos entre rotacionais e translacionais (GUIDICINI & NIEBLE, 1983).

O escorregamento rotacional é um tipo de deslizamento em que a superfície de ruptura é curvada no sentido superior, em forma cilíndrica ou de colher (Figura 5). O topo do material deslocado pode mover-se quase que verticalmente para baixo e a parte superior desse material pode inclinar-se para trás em direção ao talude. Comumente, o escorregamento rotacional ocorre em materiais mais homogêneos e assume-se que a resistência ao cisalhamento deste plano seja constante (HIGHLAND E BOBROWSKY, 2008).

Figura 5: Escorregamento circular

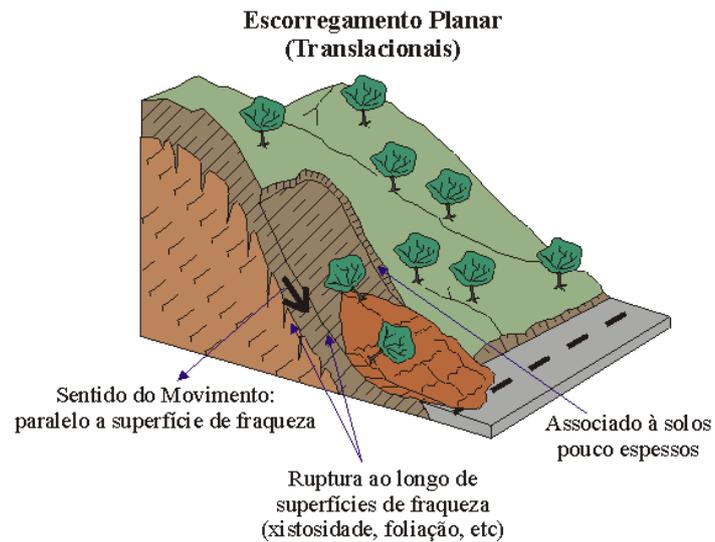


O escorregamento translacional ocorre em maciços rochosos com planos de fraqueza bem definidos, sendo condicionado pela xistosidade, fraturamento ou foliação. Este tipo de ruptura costuma mover a massa para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana, com pequeno movimento rotacional ou inclinação para trás. Um dos fatores causadores pode estar ligado ao aumento da poropressão, devido a chuvas intensas que levam ao encharcamento do solo (HIGHLAND E BOBROWSKY, 2008).

O movimento translacional, pode gerar duas formas distintas de escorregamento de massa. A ruptura planar, quando o plano de fraqueza é paralelo ao plano de ruptura (Figura 6).

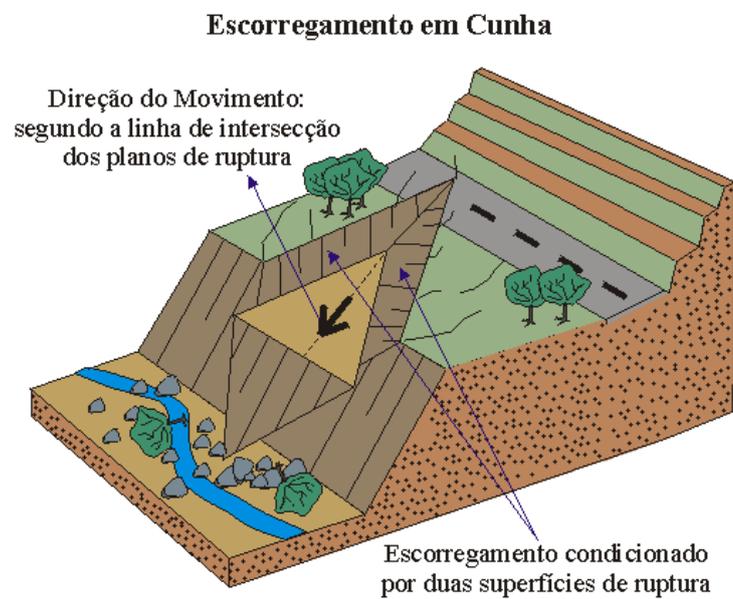
Mas também, quando planos de fraqueza se cruzam, a ruptura acontece em forma de cunha, delimitada por dois ou mais planos de ruptura (Figura 7).

Figura 6: Um plano de fraqueza



Fonte: Adaptado de Reis (2021)

Figura 7: Dois planos de fraqueza, gerando uma cunha



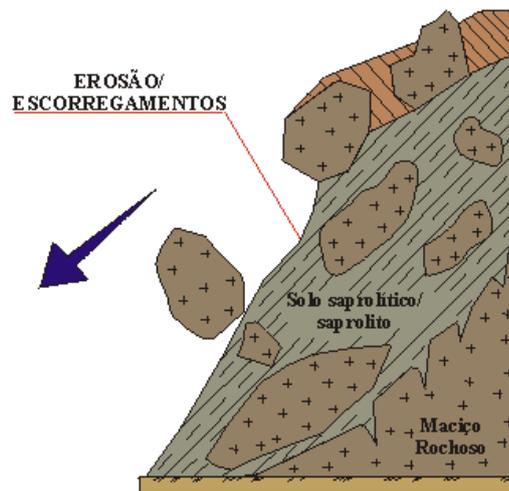
Fonte: Adaptado de Reis (2021)

### 3.4.3. QUEDA

Segundo Highland e Bobrowsky (2008), a queda de blocos se inicia com a separação do solo e/ou da rocha, de um talude íngreme, na qual tenha ocorrido pouco ou nenhum deslocamento por cisalhamento. Essa queda, pode ser caracterizada por velocidade de deslocamento rápida ou muito rápida, maior que nos escorregamentos.

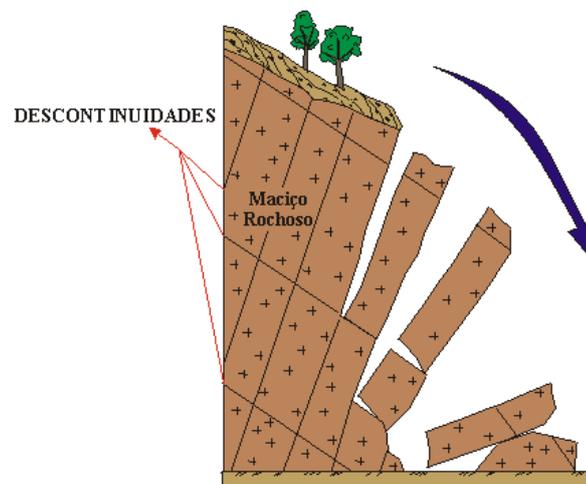
O efeito do intemperismo, das amplitudes térmicas e ação antrópica são exemplos causadores de quedas de blocos. Resultando o desprendimento de blocos grandes (matacões) e ocasionando a movimentação. Esses movimentos de queda abrangem desde o rolamento de matacões (Figura 8) a tombamentos (Figura 9).

Figura 8: Rolamento de blocos



Fonte: Adaptado de Reis (2021)

Figura 9: Tombamento de blocos



Fonte: Adaptado de Reis (2021)

#### 3.4.4. CORRIDA

O movimento de corrida é caracterizado por deslocamento de solo e rocha em altas velocidades, devido a perda de resistência ao cisalhamento do solo. As corridas têm comportamento fluido e possuem elevado raio de alcance, mesmo quando a angulação do terreno não é elevada. Podem ser classificadas em alto potencial destrutivo (QUEIROZ, 2016).

O fluxo de corrida de material pode ser definido em duas zonas de classificação, sendo elas a primária, que corresponde a corrida de massa com material proveniente somente das encostas. E a secundária, quando ocorre a corrida de massa nas drenagens principais, resultante dos detritos acumulados no leito e por barramentos naturais, adicionados com o material de escorregamentos das encostas e relativo volume de água das cheias das drenagens (REIS, 2021).

Ademais, com base nas características do material presente no fluxo de movimentação, as corridas recebem três tipos de classificação, representados na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação de corrida, baseado na composição do material.

Estilo de corrida	Características
Corrida de Terra (earth flow):	Baixa quantidade de água, ocasionando baixa velocidade relativa
Corrida de Lama (mud flow):	Alto teor de água, ocasionando média velocidade relativa e com alto poder destrutivo
Corrida de Detritos (debris flow):	Material predominantemente grosseiro, constituído por blocos de rocha de tamanho variável, apresentando um maior poder destrutivo

Fonte: Adaptado de Reis (2021)

### 3.5. CONCEITOS BÁSICOS E TERMINOLOGIAS APLICADAS A MINERAÇÃO

O processo de mineração apresenta cinco fases, sendo elas a prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra, fechamento. A fase de prospecção está relacionada aos estudos e reconhecimentos geológicos buscando a descoberta dos minerais de interesse em proporções de várias ocorrências em uma mesma área. A exploração corresponde à fase de pesquisa mineral, que busca a investigação do subsolo para definição das dimensões da jazida. O desenvolvimento é a fase que traça todo o planejamento da exploração da jazida, consolidando informações desde a abertura de uma mina até o fechamento. A fase de lavra refere-se a exploração do minério, que tem como finalidade o aproveitamento industrial da jazida. E por fim, a fase de fechamento em que consiste no planejamento da desativação total das estruturas de uma mina, de maneira a seguir um roteiro que envolve aspectos, ambientais e socioculturais.

Para que aconteça o desenvolvimento de um empreendimento mineiro, são necessárias mudanças na geografia local, de maneira que desenvolva uma cava para a exploração do minério, o desenvolvimento de pilhas de estéril, a criação de usinas e o desenvolvimento de barragens para contenção de sedimentos. A Figura 10, representa de forma esquemática as mudanças ocasionadas pela geração de um empreendimento mineiro.

Figura 10: Esquemática de um empreendimento mineiro



Fonte: Adaptado de Adones (2019)

O processo de lavra define a forma que o minério vai ser explorado, seja de maneira superficial ou subterrânea. As minas a céu aberto podem ser desenvolvidas a partir de cavas, abaixo da cota original do terreno, ou meia encosta, acima do nível de escoamento da drenagem (ADONES, 2019). De maneira em que ocorre a lavra, as mudanças de topografia resultam

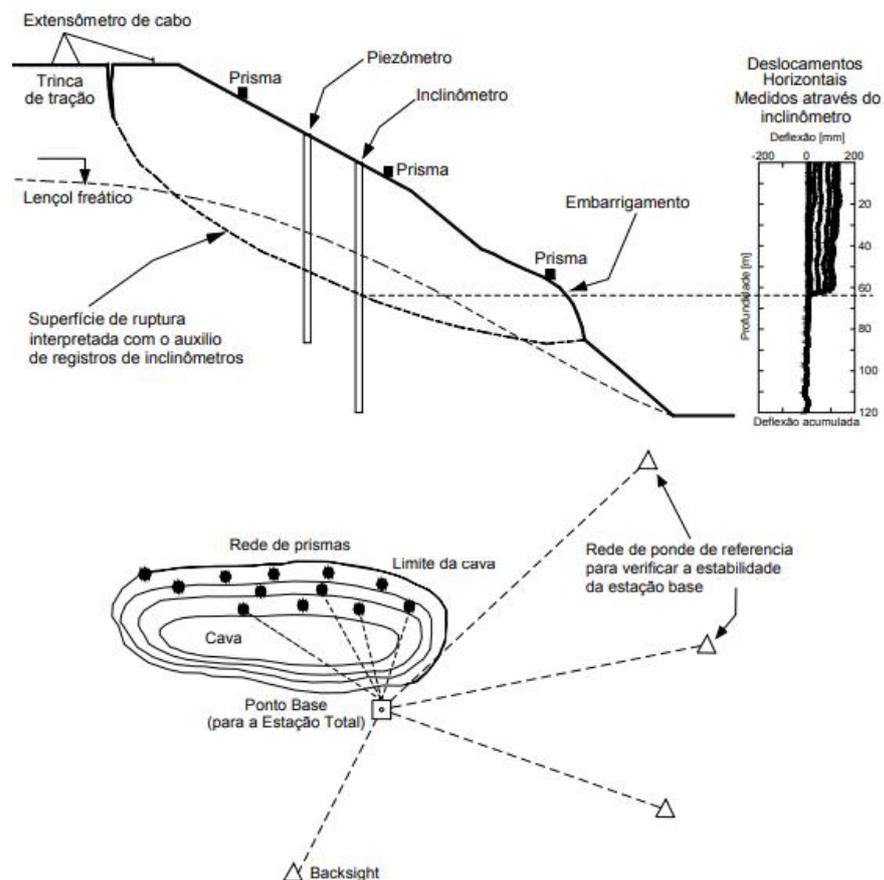
taludes no contato de minério-estéril, que devem ser monitorados, para que ocorra a estabilidade das estruturas.

### 3.5.1. MONITORAMENTO DE TALUDES DE MINERAÇÃO

O monitoramento dos taludes de mineração é uma forma de garantir o entendimento da condição geotécnica das estruturas. Ele pode ser feito através de inspeções geotécnicas visuais, que visam a busca por trincas, surgências e/ou erosões nas bermas ou face dos taludes. Além disso, é capaz de ser realizado por meio de instrumentação, que permite gerar leituras do nível d'água em piezômetros ou do acompanhamento das leituras de monitoramento topográfico, resultante da movimentação dos prismas alocados na face ou berma dos taludes.

Com os dados do monitoramento periódico dos taludes, é possível desenvolver um banco de dados destas estruturas, que auxilia na interpretação de possíveis oscilações, e permite o estabelecimento de níveis de controle, de atenção e de urgência (PEREIRA, 2021). A representação na Figura 11 proposta por Huallanca (2004), traz os principais tipos de monitoramento.

Figura 11: Modelo de instrumentação em taludes



Fonte: Adaptado de Huallanca (2004)

Com base na leitura dos prismas de monitoramento, é possível dimensionar gráficos que demonstram deslocamentos verticais e horizontais da instrumentação. Dessa forma, a instalação dos prismas faz-se necessária para o acompanhamento das deformações superficiais do maciço (PEREIRA, 2021).

### 3.6. ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM TALUDES

A partir da definição da geometria do talude e após determinar as condições do subsolo, fica possível realizar a análise de estabilidade do talude, seja a partir de metodologias de equilíbrio-limite ou de análise tensão-deformação, que devido a sua complexidade, emprega métodos numéricos para sua solução (PEREIRA, 2021).

#### 3.6.1. FATOR DE SEGURANÇA

Segundo Gerscovich (2016), o objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade do acontecimento de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Para isso, a Associação Brasileira de Normas Técnicas propôs a NBR 11682 (ABNT, 2009), definindo que o fator de segurança (FS) é a razão da resistência ao cisalhamento pelas tensões cisalhantes mobilizadas, conforme a Equação 9.

$$FS = \frac{\textit{Resistência ao cisalhamento}}{\textit{Tensões cisalhantes mobilizadas}} \quad (9)$$

Por recomendação da NBR 11682 (ABNT, 2009) os valores mínimos de FS foram estabelecidos de acordo com a utilização e localização das encostas (Tabela 8). Isso porque, os valores resultantes do cálculo de fator de segurança não é o fator real do talude, devido às imprecisões não levadas em consideração no cálculo, como parâmetros de resistência de rocha, distribuição da poropressão e até mesmo da estratigrafia do solo. Portanto, são exigidos FS maiores que os pré-estabelecidos pela norma, variando de acordo com o empreendimento, perdas vitais e materiais relacionados com um possível rompimento.

Tabela 8: Fatores de segurança mínimo exigidos pela NBR 11682 (ABNT, 2009)

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

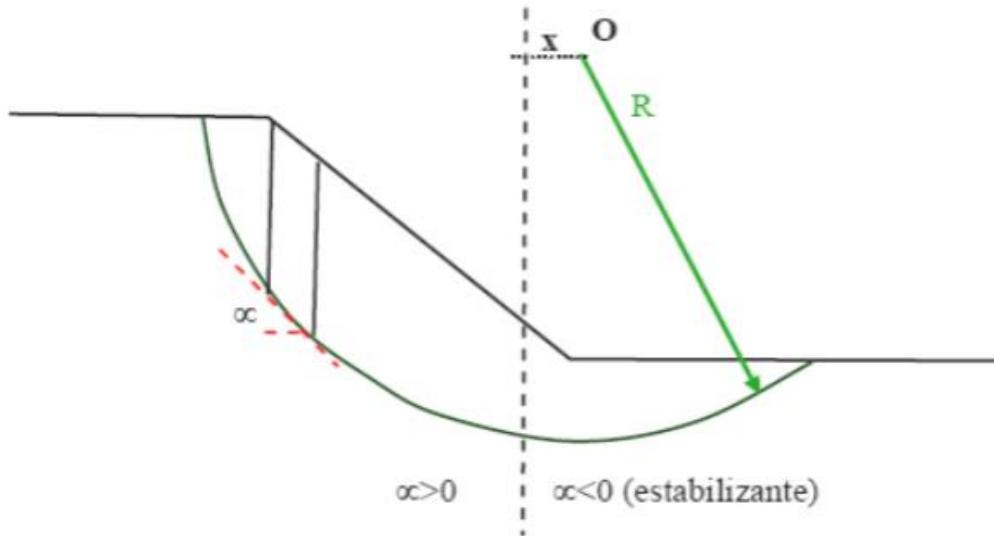
Fonte: Adaptado de NBR 11682 (ABNT, 2009)

### 3.6.2. MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

O método de equilíbrio limite permite a determinação do fator de segurança do talude baseado nas informações como a poropressão da rocha e propriedades do solo. Para a utilização do método, necessita-se de hipóteses acerca do mecanismo de ruptura que afetará o talude, assumindo que ao longo da superfície de ruptura atuam parâmetros conhecidos de resistência ao cisalhamento (SILVA, 2013).

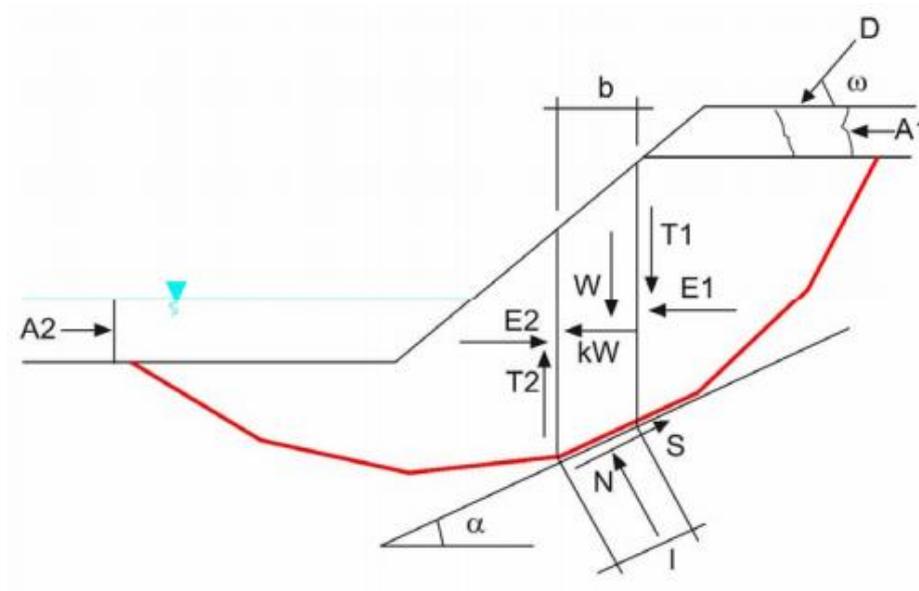
Segundo Gerscovich (2016), o método das fatias é o mais utilizado em estudos de estabilidade de taludes, devido não apresentar restrições referentes a homogeneidade do solo, geometria do talude e sobre as tensões efetivas ou totais. As análises podem ser feitas estudando toda a superfície falha ou dividindo em parcelas ou lamelas. O método das lamelas, representado na Figura 12, foi desenvolvido por Petterson & Fellenius (1936), ao longo do tempo foi aperfeiçoado. Para a análise ser eficaz, em cada fatia são aplicadas todas as condições de equilíbrio (Figura 13).

Figura 12: Método das Fatias



Fonte: Adaptado de Gerscovich (2016)

Figura 13: Forças atuantes em cada fatia



Fonte: GEO SLOPE/W *apud* PACHECO (2005)

Onde,

$W$  = Peso da fatia

$N$  = Força normal

$S$  = Força tangencial

$D$  = Força aplicada na superfície

$kW$  = Força horizontal para incorporar efeitos sísmicos

$b$  = Largura da fatia

$l$  = Comprimento da base da fatia

$A_1, A_2$  = Forças hidrostáticas

$E_1, E_2$  = Componente horizontal das forças entre as fatias

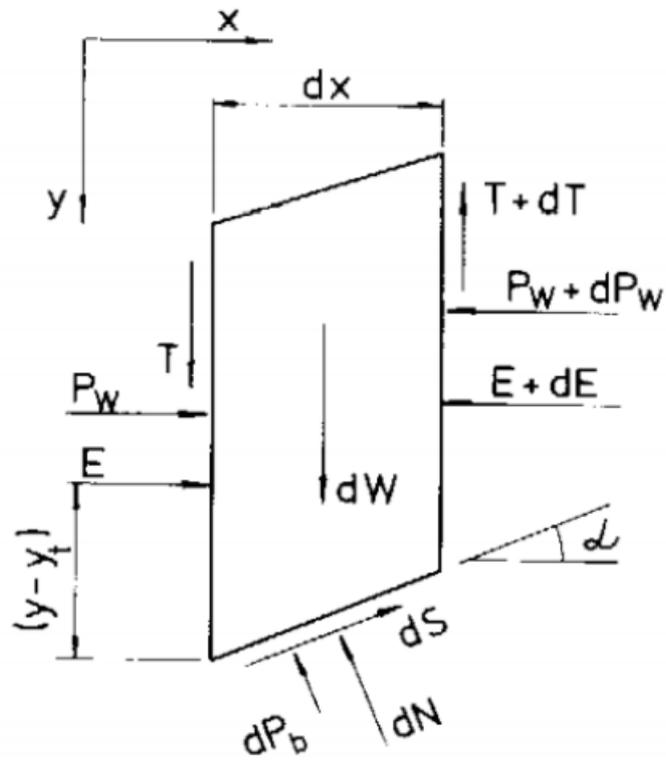
$T_1, T_2$  = Componente vertical das forças entre as fatias

Posteriormente, outros métodos foram desenvolvidos e nos últimos anos vem sendo bastante utilizados, como o método de Bishop (1955) e Janbú (1954), mas os métodos mais precisos e complexos são os desenvolvidos por Morgenstern & Price (1965) e Spencer (1967), que quando alinhados com *softwares* permitem uma análise detalhada e rigorosa para atestar a estabilidade de um talude.

#### 3.6.2.1. MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE POR MORGENSTERN & PRICE

O método desenvolvido por Morgenstern & Price (1965) é considerado por ser um método rigoroso, devido possuir metodologia de cálculo do fator de segurança na premissa do método de equilíbrio limite e podendo ser aplicável em todas as superfícies, adicionando as superfícies de ruptura em formato não circular. As forças consideradas por esse método estão demonstradas na Figura 14.

Figura 14: Forças aplicadas em uma fatia pelo método de Morgenstern & Price (1965)



Fonte: Adaptado de Fabricio (2006)

Onde,

$P_w$  = pressões neutras nas laterais da fatia

$dP_b$  = resultante das pressões neutras na base da fatia

$dW$  = força peso da fatia

$dN$  = força normal na base da fatia

$dS$  = força cisalhante mobilizada na base da fatia

$E$  = força normal entre as fatias

$T$  = força tangencial entre as fatias

De acordo com Morgenstern & Price (1965), para resolver a indeterminação matemática é necessário relacionar as forças interlamelares ( $E$  e  $T$ ), conforme representado na Equação 10.

$$T = \lambda f(x) E \quad (10)$$

Onde,

$\lambda$  é a constante a ser determinada por processo iterativo

$f(x)$  é uma função arbitrária que precisa ser especificada

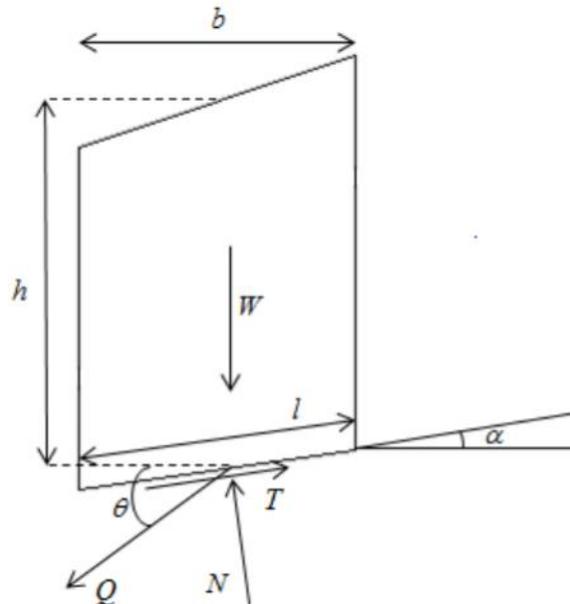
De acordo com Morgenstern & Price (1965), sugere-se que para o valor de  $f(x)$  seja a função arco de seno, sendo a função que menos impacta no valor final do fator de segurança.

### 3.6.2.2. MÉTODO DE EQUILÍBRIO LIMITE POR SPENCER

Inicialmente, o método desenvolvido por Spencer (1967) era para direcionados a rupturas circulares e depois adaptado para superfícies de deslizamento com formas irregulares. E, da mesma maneira que o método de Morgenstern & Price (1965), é considerado um método rigoroso, uma vez que atende todas as equações de equilíbrio de forças e momentos.

O método de Spencer (1967), baseia-se na análise do equilíbrio limite, tendo em vista que a divisão do perfil do talude é em fatias. Dessa forma, considerou que as forças  $X_i$ ,  $Y_i$  e  $X_{i+1}$ ,  $Y_{i+1}$  poderiam ser substituídas por uma resultante  $Q$  que assume uma inclinação constante  $T$  com a horizontal. A Figura 15, representa as forças atuantes na base da fatia.

Figura 15: Forças atuantes na base da fatia pelo método de Spencer (1967)



Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

Pressupõe-se que a componente sísmica seja nula e que os componentes de equilíbrio se satisfaçam, a força  $Q$  deve passar pelo ponto de intercessão das forças (ponto médio da base da fatia). Isso faz com que a reação da força normal  $N$ , seja obtida pelo equilíbrio de forças na direção paralela e perpendicular à base das fatias.

Impondo que o equilíbrio de forças esteja nas direções normal e paralela à base da fatia, e considerando que o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, encontra-se a Equação 11.

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot l}{FS} + \frac{(W \cdot \cos\alpha - u \cdot l) \cdot \tan\phi'}{FS} - W \cdot \sin\alpha}{\cos(\alpha - \theta) \cdot \left( \frac{1 + \tan\phi' \cdot \tan(\alpha - \theta)}{FS} \right)} \quad (11)$$

Pressupondo que não existam forças externas atuando no talude, tanto a componente horizontal como vertical da força Q devem ser nulas, dessa forma, obtêm-se as equações 12 e 13.

$$\sum Q \cdot \cos\delta = 0 \quad (12)$$

$$\sum Q \cdot \sin\delta = 0 \quad (13)$$

Dessa forma, a soma dos momentos das forças externas em relação ao centro de rotação é igual a zero, conseqüentemente, a soma dos momentos das forças entre as fatias em relação ao centro também é igual a zero. Então, é possível determinar a Equação 14:

$$\sum Q \cdot R \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (14)$$

Considerando a superfície R como uma constante, obtêm-se a Equação 15.

$$R \cdot \sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (15)$$

E assim, a Equação 16.

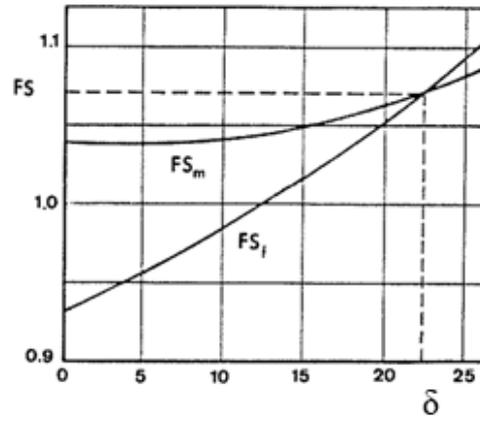
$$\sum Q \cdot \cos(\alpha - \delta) = 0 \quad (16)$$

Portanto, para que o sistema final de equações fosse possível de ser solucionado, Spencer (1967) considerou que as forças de interação entre as fatias são paralelas e a hipótese de  $\delta$  ser constante ao longo do talude. Simplificando as Equações 12 e 13 na Equação 17.

$$\sum Q = 0 \quad (17)$$

Por fim, ao determinar o valor de Q pela Equação 11 e condicioná-lo a equação 16 e 17, a solução final pode ser determinada de maneira gráfica (Figura 16). Plotam-se os valores encontrados a partir das Equações 15 e 16, variando o valor do ângulo  $\delta$ . Assim, terá o ponto de interseção das duas curvas corresponde ao fator de segurança e inclinação que satisfazem as duas equações, sendo por isso esse, o valor do fator de segurança correspondente ao talude em estudo.

Figura 16: Determinação do fator de segurança (Spencer, 1967)

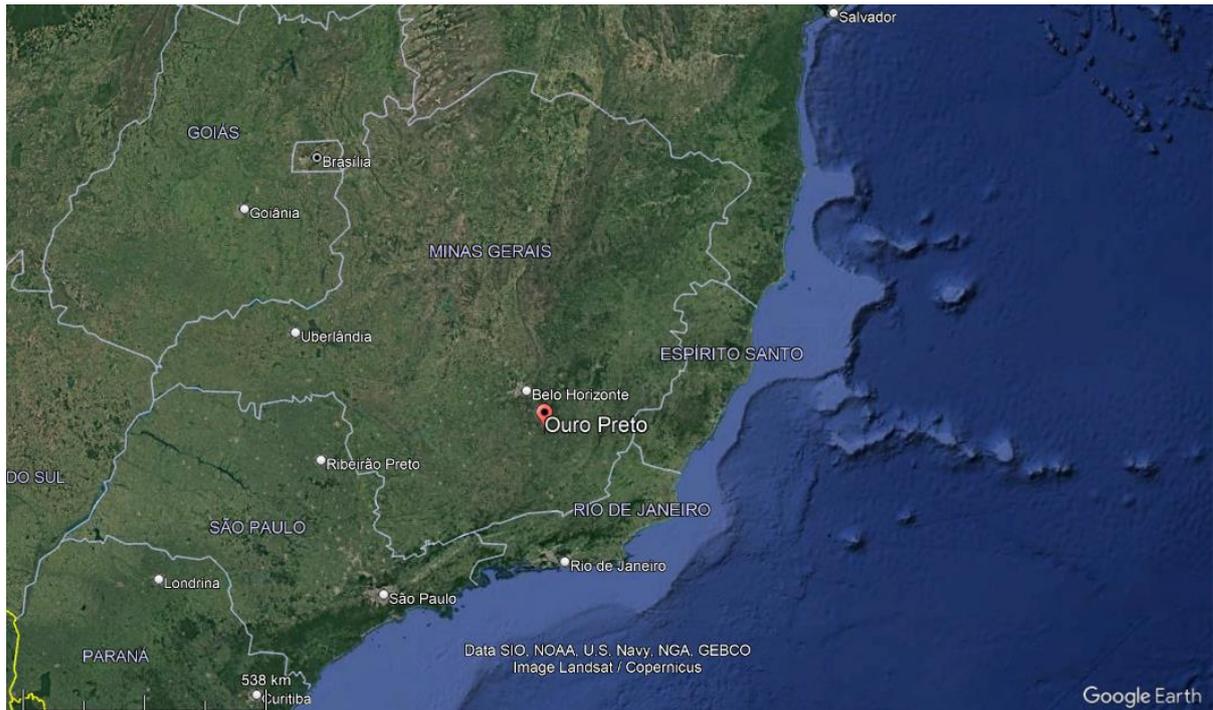


Fonte: Adaptado de Ferreira (2012)

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, mais especificamente na região da cidade de Ouro Preto, onde através das operações unitárias é extraído minério de ferro da jazida.

Figura 17 - Localização da cidade de Ouro Preto, MG.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023)

O complexo minerário em estudo, identificado neste trabalho, será nomeado como Mina Fe. Esse complexo possui algumas áreas de cavas a céu aberto, pilhas de estéril e barragens de rejeito. Dentre todas as áreas, tem-se a Cava Um, objetivo de estudo deste trabalho. Tendo em vista que a empresa não autorizou a identificação, os nomes citados acima, são pseudônimos.

A Mina Fe possui registros de atividades de exploração de minério de ferro desde a década de 70. Por sua vez, a operação não tinha o mesmo padrão dos dias de hoje. Sendo assim, a exploração do minério e o empilhamento de estéril propiciava um cenário em que trincas, deformações e rompimentos localizados eram constantes e rotineiros. Em 2015, em Mariana – MG, aconteceu o rompimento da barragem de rejeito de Fundão e assim, mudanças de maneira geral começaram acontecer nas mineradoras e os órgãos fiscalizadores aumentaram o rigor em relação à segurança. Porém, em 2019, a barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho – MG, então considerada de baixo risco de rompimento, colapsou. A partir da sequência de

rompimentos, a Agência Nacional de Mineração (ANM), aumentou a frequência de fiscalização e passou a exigir evidências com a finalidade de garantir estabilidade das estruturas geotécnicas. Com essas mudanças, a Mina Fe, que possui várias estruturas antigas, sofreu sanções que acarretaram a paralisação do desmonte com explosivos, devido gerar abalos sísmicos que poderiam alterar a estrutura das barragens. Atualmente, o desmonte ocorre por meio de rompedores, o que impossibilita a lavra de materiais com alta resistência.

#### 4.1. CAVA UM

A Cava Um (Figura 18) encontra-se paralisada para operação, o que pode ocasionar problemas para a estrutura, uma vez que a manutenção dos taludes não está acontecendo. Porém, as inspeções geotécnicas para investigação de anomalias, ocorre de frequência semanal por técnicos de mineração e resulta em um controle rígido da área, de forma em que se houver situações em que possa ter algum potencial de dano material, pessoal ou ambiental, as medidas corretivas são acionadas em caráter prioritário e cesse um possível desastre.

Figura 18: Vista geral da Cava Um



Fonte: Autor (2023)

A cava é setorizada por paredes, denominadas como 1, 2, 3 e 4 e estão representadas na Figura 18. Destaca-se a parede 2, uma vez que é o objeto de estudo deste trabalho.

Figura 19: Cava setorizada por paredes 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autor (2023)

#### 4.2. PAREDE 2

De maneira geral, a parede 2 possui inclinação do talude global próximo dos 30° e os bancos com uma altura média de 10 metros. A parede é resultante do processo de lavra que ocorreu nos últimos anos e é considerada como uma parede de estéril, possuindo o filito como litologia predominante. É constatada a presença de uma família de descontinuidade nos três bancos superiores.

Na Figura 19, uma vista aérea da Cava Um, em meio as paredes cinzas condizentes ao minério de ferro, a presença de uma cor avermelhada fica notável, a qual é representada pela parede 2, isto se dá, devido à presença característica do filito na face do talude. De acordo com A. P. Ribeiro *et al.* (2000), o filito é uma rocha metamórfica de baixo grau, finamente granulada, onde predominam argilominerais, da subclasse dos filossilicatos, pertencentes à classe dos silicatos.

Figura 20: Vista aérea da Cava Um



Fonte: Documentos internos (2022)

Por sua vez, o filito apresenta características de foliação em sua estrutura, e apresenta um brilho sedoso, notável na amostra representada na Figura 20. Quando se fala em composição mineralógica, a grande maioria dos filitos apresentam micas, caulinita, pirofilita, clorita, quartzo e feldspatos, em proporções diversas (A. P. Ribeiro *et al.* 2000). É classificado como uma rocha friável e de fácil manuseio, ou seja, não demanda de explosivos para um desmonte.

Figura 21: Amostra de filito



Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.1. INSPEÇÕES NOS TALUDES E BERMAS DA PAREDE 2

Como forma de monitoramento da área, foi definido pelos geotécnicos responsáveis pela Cava Um, que os técnicos deveriam inspecionar todas as bermas e faces dos taludes da parede 2 semanalmente. Com essa frequência, é possível acompanhar a real condição da estrutura, bem como fiscalizar aparições de trincas ou surgências e, assim, tomar medidas cabíveis para solucioná-las da maneira mais rápida.

#### 4.2.2. SURGIMENTO DA TRINCA

De acordo com documentações internas, em abril de 2021, após a solicitação da equipe de geotecnia para uma demanda de roçada da vegetação, presente na face dos taludes da parede 2, constatou-se o surgimento de uma trinca (Figura 22) em uma das bermas de um dos bancos superiores. Essa trinca, estava bem próxima a uma descontinuidade na junção da crista e face do talude.

Figura 22: Surgimento da trinca



Fonte: Documentos internos (2021)

#### 4.2.3. MONITORAMENTO TOPOGRÁFICO

Com intuito de monitorar o comportamento dos taludes, a partir do surgimento da trinca, foram instalados 7 (sete) prismas de monitoramento (Figura 23). Destes, 5 (cinco) na primeira

berma e 2 (dois) na segunda berma, próximo a crista do talude. Desta forma, foi possível criar um cronograma com frequência semanal para realizar as medições referentes ao deslocamento deles.

Figura 23: Instalação dos prismas de monitoramento



Fonte: Autor (2023)

A Figura 24, representa em campo, o prisma MTA\_07 localizado na segunda berma.

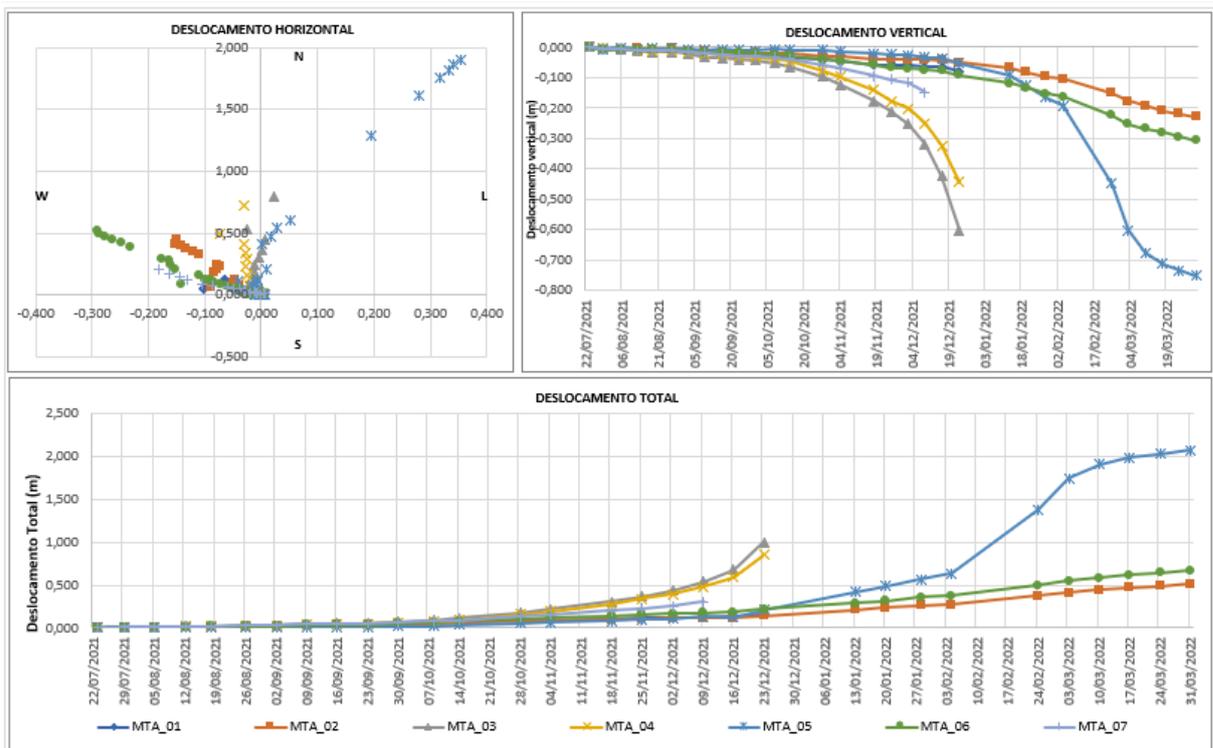
Figura 24: Prisma MTA\_07 instalado na segunda berma



Fonte: Documentos internos (2021)

No dia 15 de abril de 2021, começaram as leituras referentes ao deslocamento dos prismas. Uma vez que os dados foram registrados e cadastrados no sistema interno, foi possível criar um gráfico, com o auxílio do Excel, para entender o comportamento dos taludes da parede 2. No mês de julho de 2021, as movimentações começaram a ser representativas. Com isso, a Figura 25 apresenta gráficos do comportamento horizontal, vertical e deslocamento total dos prismas no período entre 22/07/2021 e 31/03/2022, data que marca o final do período chuvoso.

Figura 25: Comportamento horizontal, vertical e deslocamento total dos prismas



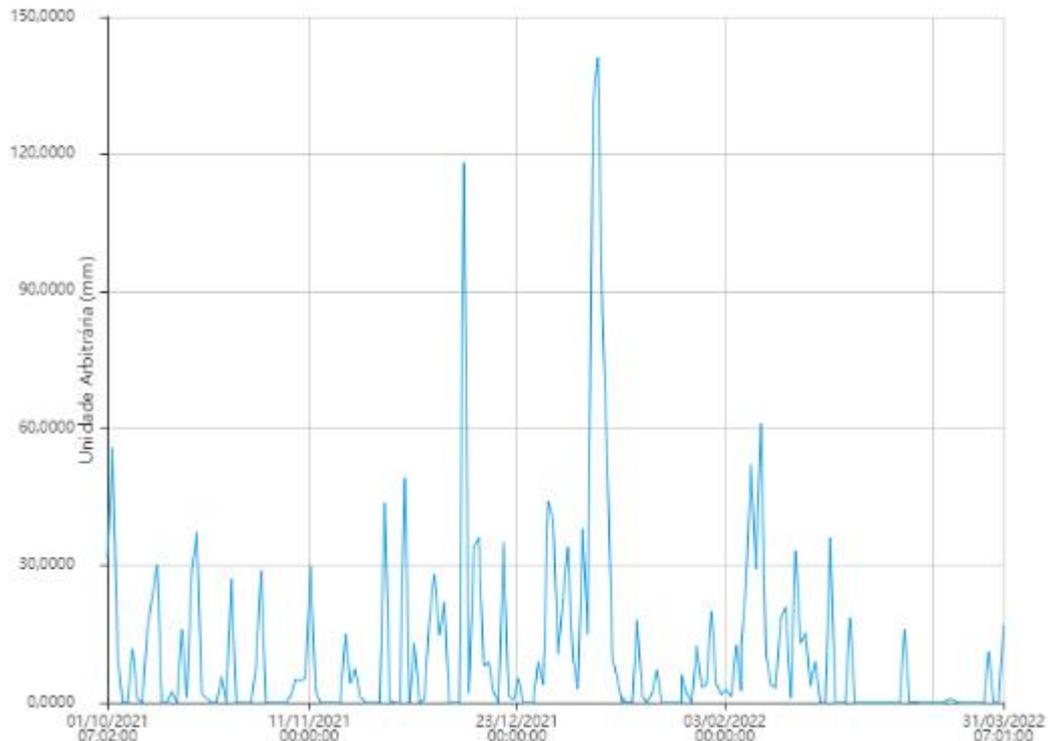
Fonte: Autor (2023)

Ressalta-se que o prisma MTA\_07 foi perdido em 09/12/2021 e os prismas MTA\_01, MTA\_04 e MTA\_05 foram perdidos em 23/12/2021. Isso se deu, por conta do escorregamento do material, ocasionado por uma ruptura em proporção global, decorrente da evolução da trinca, associado ao início do período chuvoso.

#### 4.2.4. RUPTURA CIRCULAR GLOBAL

Com o início do período chuvoso em outubro de 2021, as movimentações dos prismas evoluíram. Pode-se relacionar esta evolução com o agravamento das trincas ocasionados pela percolação de água da chuva. A Figura 26, representa a pluviometria na Mina Fe, equivalente a 2.000 mm no período de outubro/21 a março/22.

Figura 26: Pluviometria referente ao período chuvoso de 2021/22



Fonte: Autor (2023)

Foi constatado, em campo, o surgimento de diversas trincas em formato de arcos circulares nos bancos superiores. A evolução delas foi ganhando proporção, que em novembro/21, o talude superior da parede 2 rompeu, direcionado ao fundo da Cava Um. No mês de dezembro/21, o processo de escorregamento resultante do rompimento ficou evidente no monitoramento topográfico (Figura 25) e nas inspeções visuais, por meio da formação de degraus de abatimento.

No período da segunda quinzena de dezembro/21 e a primeira quinzena de janeiro/22, a pluviometria variou de 0 a 141,0 mm, chegando a um acumulado de 748,9 mm. Entre esses 30 dias, a zona de ruptura tomou proporção global, de maneira que o material de três bancos escorregasse para o fundo de cava, como mostra a Figura 27.

Figura 27: Ruptura global na parede 2



Fonte: Autor (2022)

Diante das informações observadas em campo, como o formato da trinca, a formação de degraus de abatimento e o rápido escorregamento direcionado ao fundo da Cava Um, em relação com os movimentos de massa e tipos de ruptura, apresentado no tópico 3.4 deste trabalho, foi possível classificar a ruptura como circular global.

#### 4.2.5. RETALUDAMENTO

Após a ruptura global e a conclusão do período chuvoso, engenheiros da empresa desenvolveram um projeto com objetivo de estabilizar a talude da parede 2. O projeto teve como fase de criação em abril/22 e geometria aprovada pela geotecnia no início de maio/22. A

execução do retaludamento ocorreu no período entre julho/22 e agosto/22. É possível ver o projeto em fase final na Figura 28, restando apenas a adequação de drenagem.

Figura 28: Projeto em fase final



Fonte: Documentos internos (2022)

No mês de setembro, foram instalados 8 (oito) prismas de monitoramento (Figura 29), performando a segunda e terceira berma superior, com o propósito de continuar o monitoramento anterior e compreender o comportamento da estrutura no período chuvoso de 2022/23, tendo em vista os acontecimentos recentes, histórico de ruptura circular global e projeto de retaludamento.

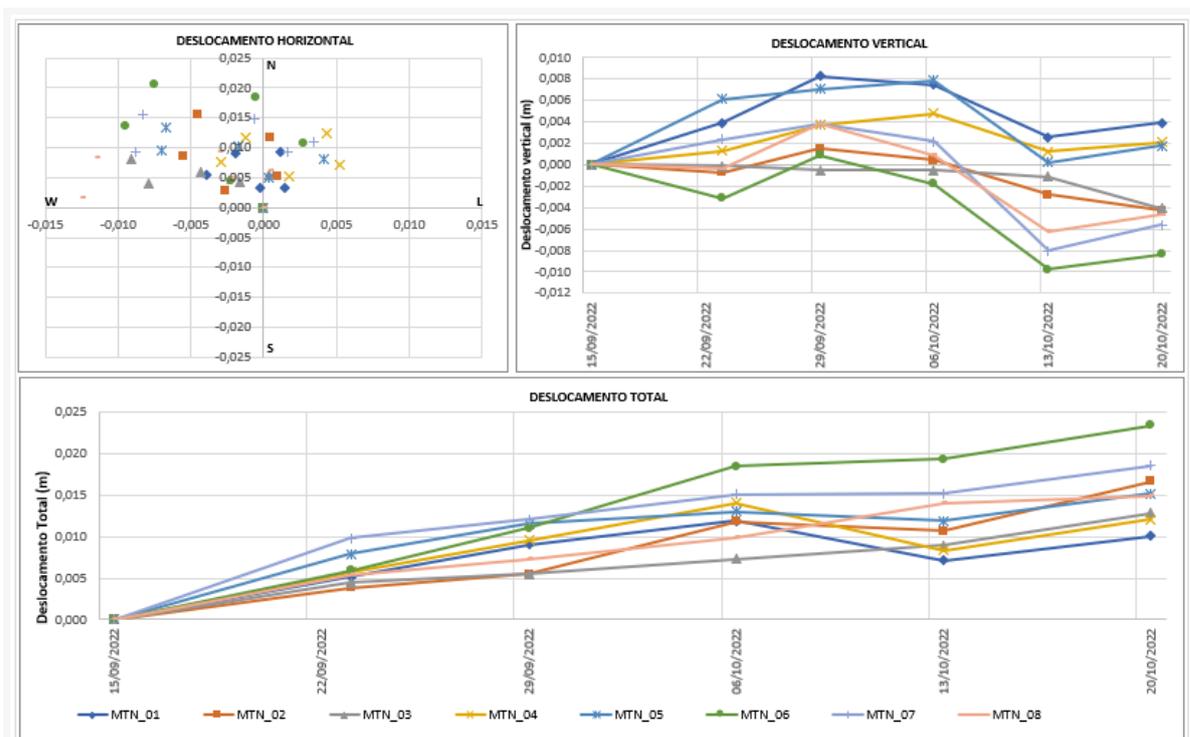
Figura 29: Localização dos novos prismas de monitoramento



Fonte: Autor (2023)

Como forma de exemplificar a leitura desses instrumentos novos, foi realizado uma nova análise do monitoramento durante o período 15/09 e 20/10/22, representado na Figura 30.

Figura 30: Comportamento horizontal, vertical e deslocamento total dos prismas novos



Fonte: Autor (2023)

## 5. METODOLOGIA

Para compreender a ruptura circular global citada no tópico 4.2.4, foi realizada uma retroanálise, visando identificar as condições das propriedades do maciço no momento da ruptura. Com isso, gerou uma oportunidade para validação dos parâmetros de resistência do banco de dados da empresa e da aplicação dos métodos de análises de estabilidade, apresentados na Figura 31. Dessa forma, proporcionou a realização de uma nova análise de estabilidade, após o retaludamento, citado no tópico 4.2.5.

Figura 31: Tipo de material e seus parâmetros de resistência

Nome do Material	Cor	Peso específico(kN/m <sup>3</sup> )	Strength Type	Coesão (kPa)	Phi (°)	UCS (kPa)	GSI	mi	D
FL		18	Mohr-Coulomb	15,5	26.6				
IF		29	Mohr-Coulomb	35	37				
IC		28	Generalized Hoek-Brown			1000	70	23	0,8
IFR		20	Mohr-Coulomb	1	35				
RO		38	Generalized Hoek-Brown			7000	55	23	0,8
LT		24	Mohr-Coulomb	50	40				
HC		45	Generalized Hoek-Brown			10000	70	23	0,8
HF		33	Mohr-Coulomb	70	34				
IAR		33	Mohr-Coulomb	70	34				
HAR		33	Mohr-Coulomb	70	34				

Fonte: Documentos internos (2023)

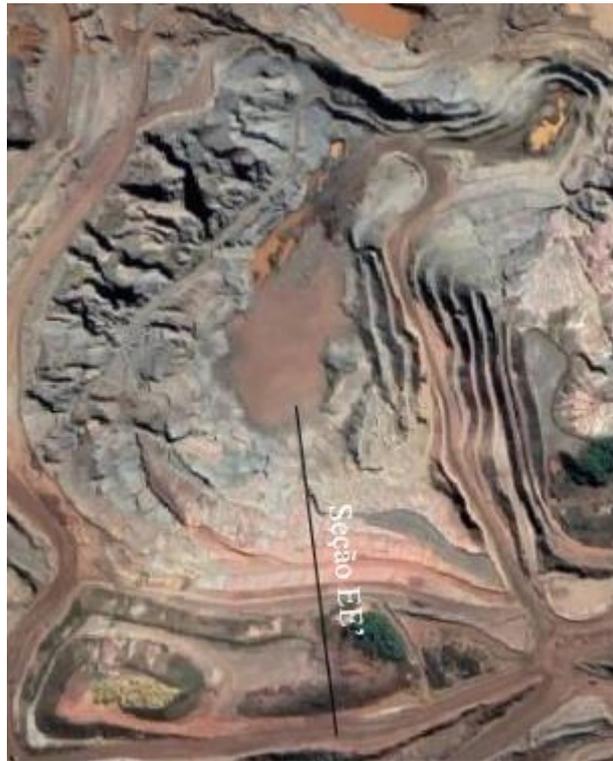
### Nota:

FL: Filito; GSI: *Geological Strength Index*; HAR: Hematitito Argiloso; HC: Hematitito Compacto; HF: Hematitito Friável; IAR: Itabirito Argiloso; IC: Itabirito Compacto; IF: Itabirito Friável; IFR: Itabirito Friável Rico; LT: Laterita; RO: Rolado.

Os parâmetros de resistência dos materiais, foram obtidos em ensaios triaxiais realizados em laboratório no ano de 2020. Todos foram submetidos a ensaios de forma drenada, ou seja, sem o comportamento de água em sua estrutura.

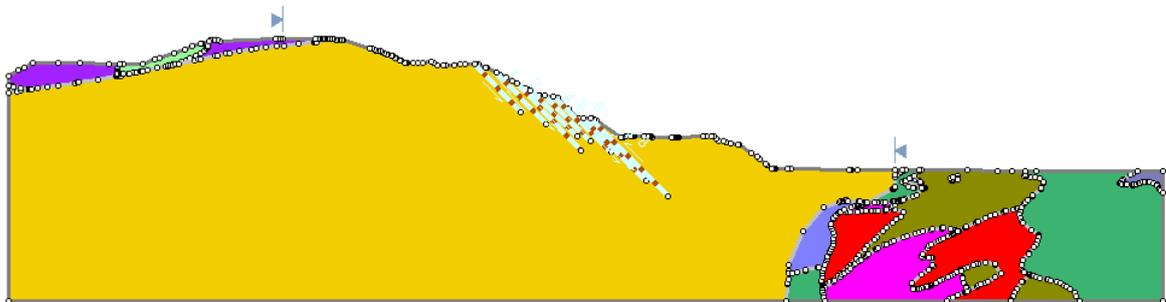
A empresa forneceu as geometrias necessárias para que as análises fossem realizadas, sendo uma do momento pré-ruptura (outubro/21) e outra do pós-retaludamento (setembro/22). A seção analisada (Figura 32), denominada por EE', gerou o perfil topográfico com as respectivas litologias para as geometrias. A Figura 33, representa o perfil geológico para a topografia de pré-ruptura e a do talude retaludado na Figura 34.

Figura 32: Seção EE'



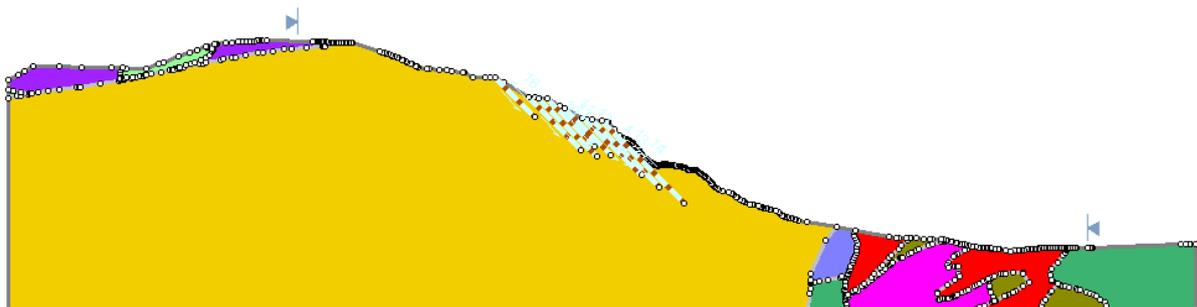
Fonte: Autor (2023)

Figura 33: Perfil topográfico referente a topografia pré ruptura



Fonte: Autor (2023)

Figura 34: Perfil topográfico referente a topografia pós retaludamento



Fonte: Autor (2023)

Para chegar nas condições de ruptura, foram inseridos parâmetros de resistência no modelo analisado, FL (inferido 1) e FL (inferido 2). Já a presença da descontinuidade (FL (descontinuidade)), foi considerada por meio da função anisotropic strength. Variando os valores de Coesão 2 e Phi 2, de acordo com a mudança do Filito inferido, representados na Figura 35.

Figura 35: Parâmetros inferidos para análise

Nome do Material	Cor	Peso específico(kN/m3)	Strength Type	Coesão (kPa)	Phi (°)	Cohesion 2 (kPa)	Phi 2 (°)
FL (descontinuidade)		18	Anisotropic strength	7	20	15,5	26,6
FL (inferido 1)		18	Mohr-Coulomb	10	23		
FL (descontinuidade 1)		18	Anisotropic strength	7	20	10	23
FL Inferido (2)		18	Mohr-Coulomb	7	20		
FL (descontinuidade 2)		18	Anisotropic strength	7	20	7	20

Fonte: Autor (2023)

As análises de estabilidade foram feitas utilizando o programa computacional Slide2 da Rocscience versão 9.020. O Slide2 é um programa bidimensional de análise de estabilidade de taludes que calcula o fator de segurança para rupturas circulares e não-circulares através do Método de Equilíbrio Limite. Os métodos de análise incluem Bishop, Janbu, Spencer, GLE /Morgenstern-Price e Bishop. Para a análise em questão, foram adotados os métodos GLE/Morgenstern-Price e Spencer.

Como parâmetros da análise por equilíbrio limite, foram utilizados:

- Número de fatias: 50
- Número máximo de iterações: 75
- Diferença tolerável em FS: 0,005

Como parâmetros utilizados para definir as opções de superfície desejada:

- Tipo de superfície: não circular
- Método de busca: Cuckoo Search
- Número inicial de vértices de superfície: 8
- Iterações máximas: 500
- Número de ninhos: 8
- Altura mínima de superfície: 15 m

Ademais, como forma de compreender o atual comportamento da estrutura, foram feitas análises de FS com os parâmetros inferidos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para entender o comportamento da estrutura, foram realizadas 6 análises de estabilidade, divididas em duas etapas. Primeiramente, foi feita a retroanálise da ruptura global em três fases, sendo que a primeira análise segue os critérios disponibilizados pela empresa, conforme valores de parâmetros de resistência, apresentados na Figura 31. Já a segunda e a terceira análise, estão com os parâmetros inferidos de acordo com Figura 35. Em seguida, a segunda etapa apresenta os resultados obtidos para a seção retalhada, seguindo as mesmas três etapas da retroanálise.

Devido à ausência de instrumentação para a medição do nível d'água, não foi considerada a presença de água ao redor da área analisada.

Os resultados foram comparados com as normas vigentes NBR 11682 (ABNT, 2009) e os documentos normativos da Mina Fe. Para utilização da NBR 11682 (ABNT, 2009) foi considerada estrutura de impacto baixo de danos materiais e pessoas, portanto, de acordo com a Tabela 8, FS mínimo igual a 1,2.

Além disso, foi demonstrado como o monitoramento topográfico auxilia no entendimento das condições atuais da estrutura, o qual confirmou a instabilização do talude retalhado.

### 6.1. ANÁLISE DE FS - RETROANÁLISE

Os parâmetros de resistência aplicados na retroanálise e os resultados do fator de segurança, estão apresentados na Tabela 9. As três análises realizadas no Slide 2, versão 9.20, estão em sequência nas Figuras 36, 37 e 38.

Tabela 9: Parâmetros de resistência das análises e resultado do fator de segurança

Análise	Parâmetros utilizados para o maciço rochoso e descontinuidade	FS pelo método de equilíbrio limite	
		GLE/Morgenstern & Price	Spencer
1ª Análise	FL: $c = 15,5 \text{ kPa}$ e $\phi = 26,6^\circ$	1,36	1,36
	FL (descontinuidade): $c1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi1 = 20^\circ$ ; $c2 = 15,5 \text{ kPa}$ e $\phi2 = 26,6^\circ$		

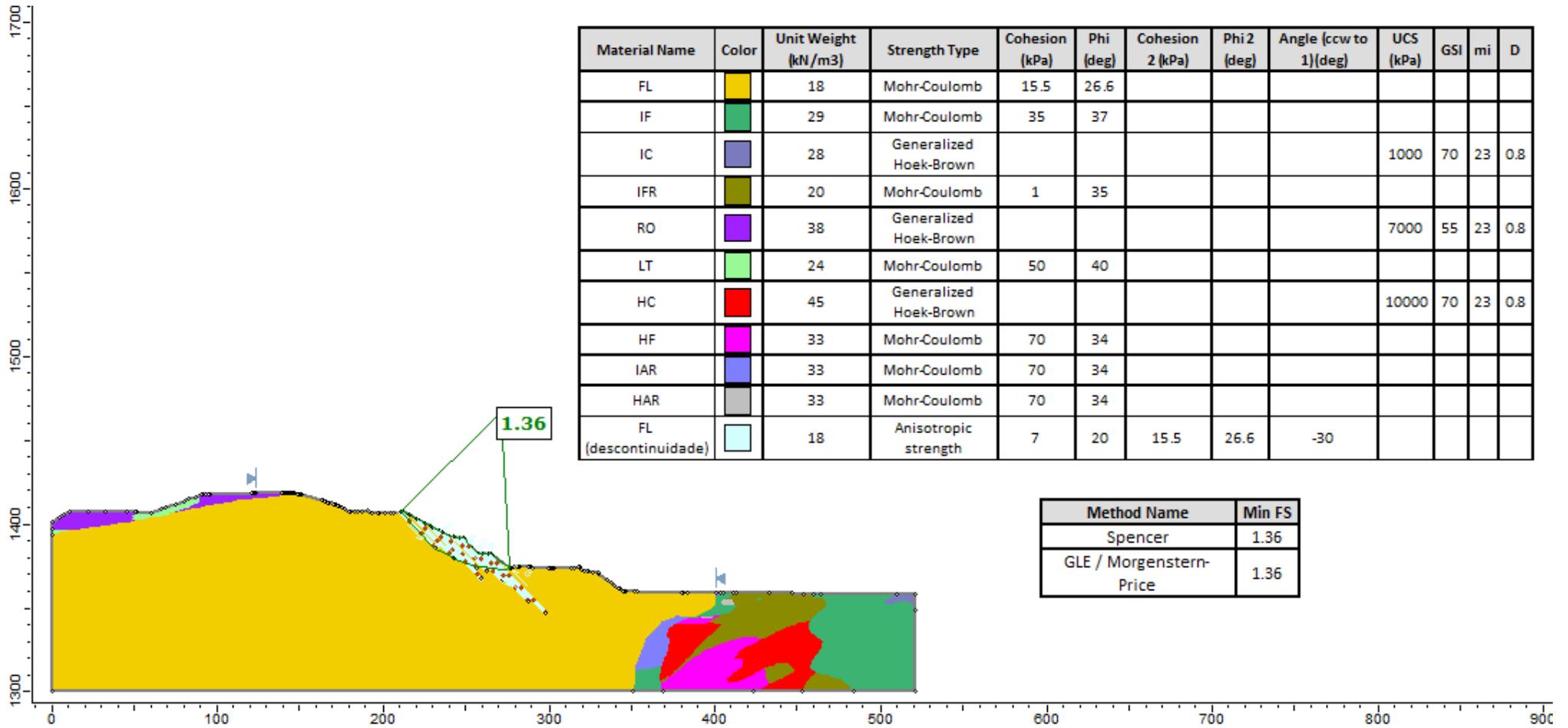
2ª Análise	FL (inferido 1): $c = 10 \text{ kPa}$ e $\phi = 23^\circ$	1,13	1,15
	FL (descontinuidade 1): $c_1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi_1 = 20^\circ$ ; $c_2 = 10 \text{ kPa}$ e $\phi_2 = 23^\circ$		
3ª Análise	FL (inferido 2): $c = 7 \text{ kPa}$ e $\phi = 20^\circ$	0,96	0,96
	FL (descontinuidade 2): $c_1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi_1 = 20^\circ$ ; $c_2 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi_2 = 20^\circ$		

Para a primeira análise, aplicou-se os parâmetros disponibilizados pela empresa, para o Filito, coesão ( $c$ ) = 15,5 kPa e  $\phi = 26,6^\circ$ , já o Filito da descontinuidade,  $c_1 = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi_1 = 20^\circ$ ;  $c_2 = 15,5 \text{ kPa}$  e  $\phi_2 = 26,6^\circ$ . Assim, observa-se na Figura 36, a seção de ruptura crítica na zona de descontinuidade e percorrendo três bancos. O fator de segurança (FS) resultante foi de 1,3, para os métodos GLE/Morgenstern & Price e Spencer. Portanto, como  $FS > 1,2$ , conclui-se que nas condições de pré ruptura, os valores estavam dentro do estabelecido na NBR 11682 (ABNT, 2009), desta forma, não indicava uma condição de instabilidade confirmada na seção analisada.

Com isso, foi necessário inferir valores para chegar nas condições de ruptura. Resultando na segunda análise, em que foram inferidas condições para o Filito,  $c = 10 \text{ kPa}$  e  $\phi = 23^\circ$ , já o Filito da descontinuidade,  $c_1 = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi_1 = 20^\circ$ ;  $c_2 = 10 \text{ kPa}$  e  $\phi_2 = 23^\circ$ . Com isso, é possível observar na Figura 37 a segunda análise, em que a seção de ruptura crítica manteve a mesma, porém, o fator de segurança diminuiu. Para o método GLE/Morgenstern & Price o FS foi de 1,13 e para Spencer de 1,15. Como ambos valores de FS estão no intervalo entre 1 e 1,2 e seguindo a NBR 11682 (ABNT, 2009), indicam condições de instabilidade da estrutura.

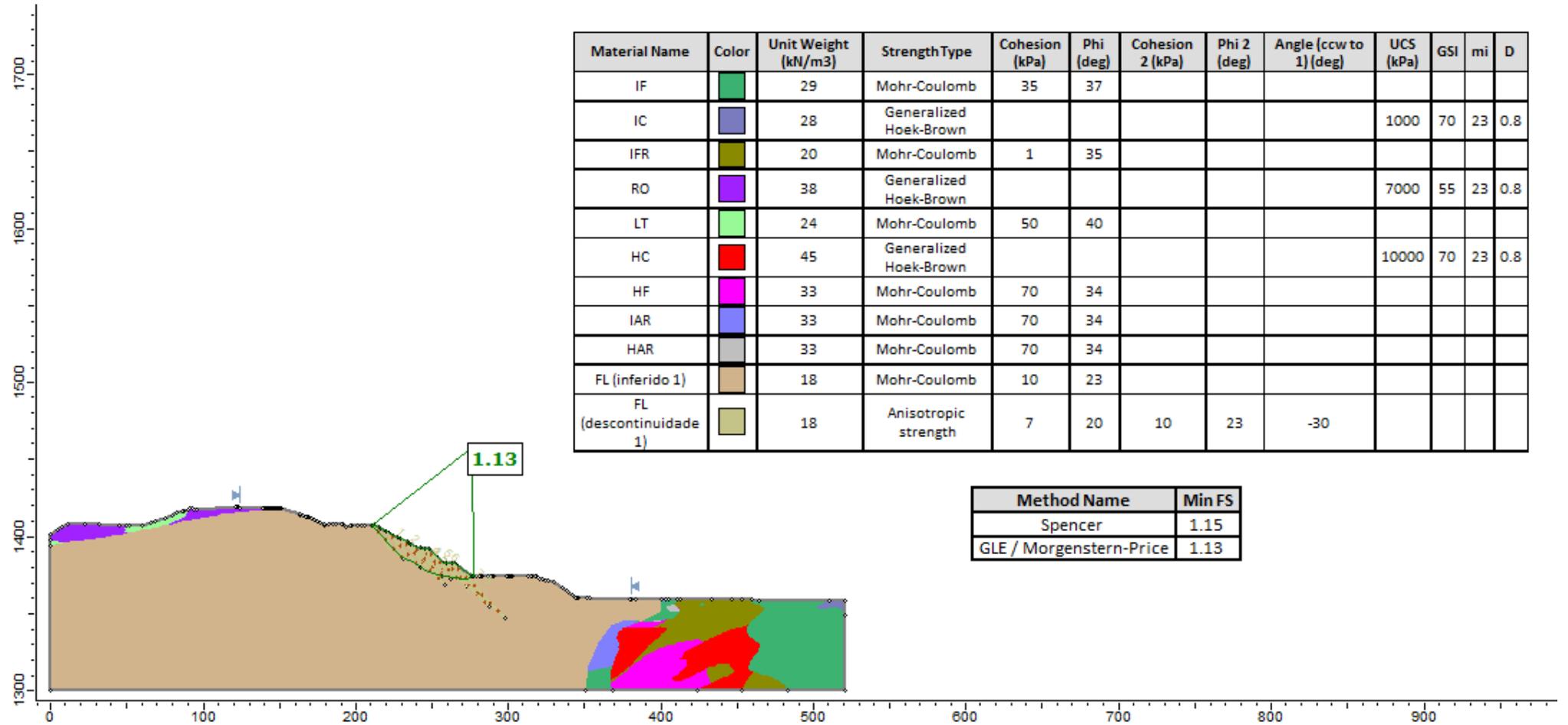
Por fim, foi necessário aplicar uma terceira análise, representada na Figura 38, com parâmetros para o Filito de  $c = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi = 20^\circ$  e para a descontinuidade de  $c_1 = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi_1 = 20^\circ$ ;  $c_2 = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi_2 = 20^\circ$ . O resultado da análise demonstrou a mesma seção crítica de ruptura das outras análises e o fator de segurança foi de 0,96 para ambos métodos testados. Tendo em vista que  $FS < 1$  e seguindo a NBR 11682 (ABNT, 2009), conclui-se que os parâmetros utilizados são próximos das condições em que resultou a ruptura em dezembro/21.

Figura 36: Resultados da primeira análise, seguindo parâmetros fornecidos pela empresa



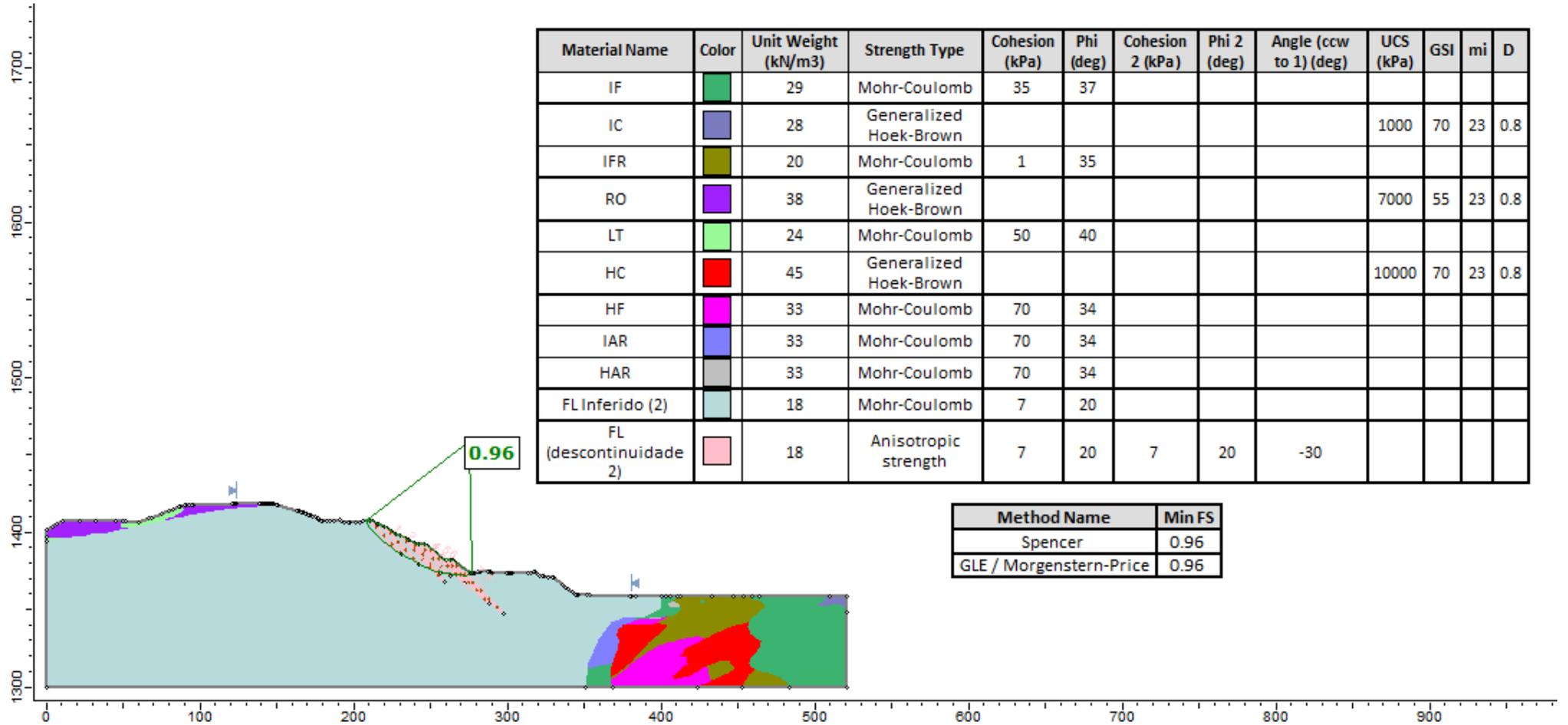
Fonte: Autor (2023)

Figura 37: Resultados da segunda análise, seguindo os parâmetros inferidos 1



Fonte: Autor (2023)

Figura 38: Resultados da terceira análise, seguindo os parâmetros inferidos 2



Fonte: Autor (2023)

## 6.2. ANÁLISES DE FS – PÓS RETALUDAMENTO

A partir da calibração dos parâmetros obtidos pela retroanálise, foi possível aplicá-los para as condições do talude retaludado, para compreender o resultado da obra e o comportamento com os dados que levaram a ruptura. Resultando valores do fator de segurança que estão apresentados na Tabela 10. As três análises realizadas no Slide 2, versão 9.20, estão em sequência nas Figuras 39, 40 e 41.

Tabela 10: Parâmetros de resistência das análises e resultado do fator de segurança

Análise	Parâmetros utilizados para o maciço rochoso e descontinuidade	FS pelo método de equilíbrio limite	
		GLE/Morgenstern & Price	Spencer
1ª Análise	FL: $c = 15,5 \text{ kPa}$ e $\phi = 26,6^\circ$	1,13	1,15
	FL (descontinuidade): $c1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi1 = 20^\circ$ ; $c2 = 15,5 \text{ kPa}$ e $\phi2 = 26,6^\circ$		
2ª Análise	FL (inferido 1): $c = 10 \text{ kPa}$ e $\phi = 23^\circ$	0,95	0,97
	FL (descontinuidade 1): $c1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi1 = 20^\circ$ ; $c2 = 10 \text{ kPa}$ e $\phi2 = 23^\circ$		
3ª Análise	FL (inferido 2): $c = 7 \text{ kPa}$ e $\phi = 20^\circ$	0,80	0,82
	FL (descontinuidade 2): $c1 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi1 = 20^\circ$ ; $c2 = 7 \text{ kPa}$ e $\phi2 = 20^\circ$		

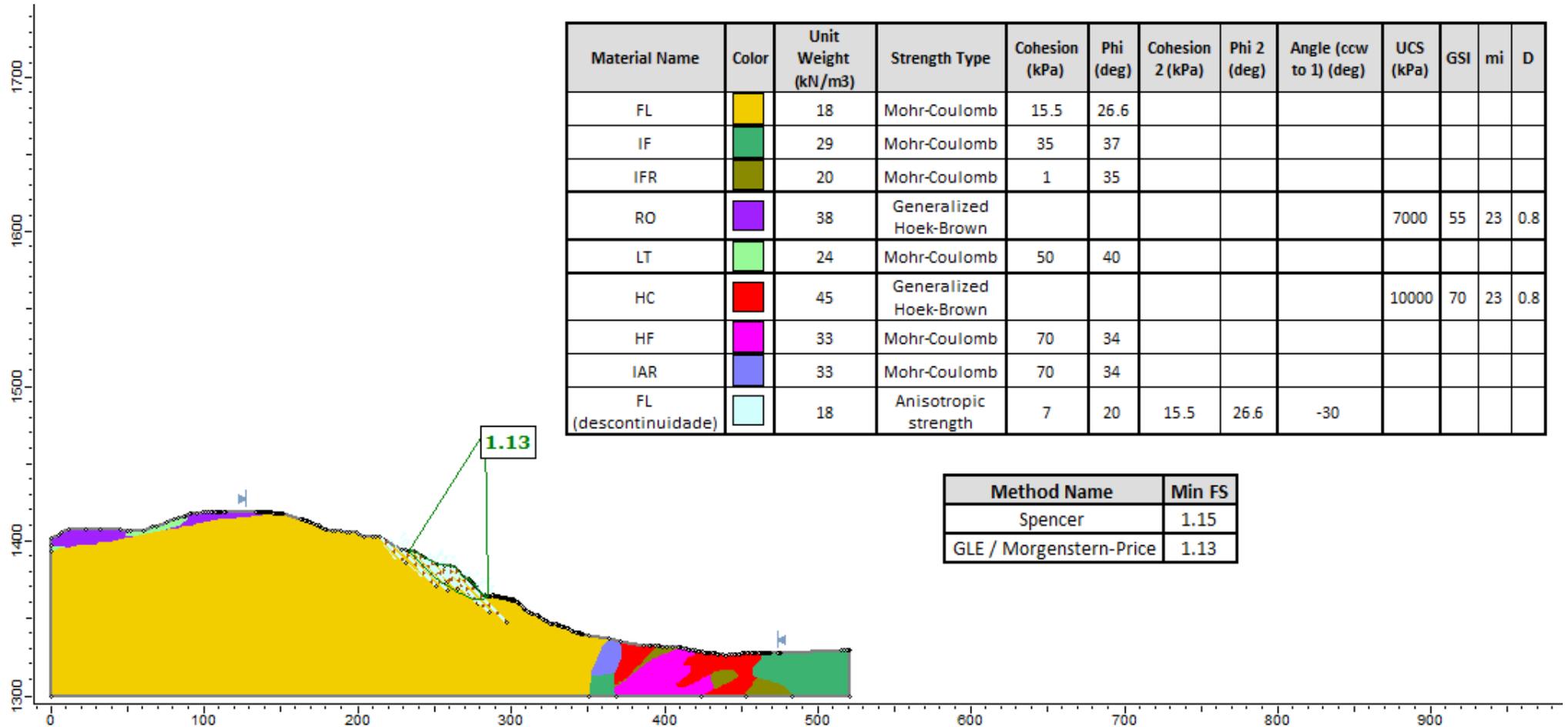
Para a primeira análise, aplicou-se os parâmetros disponibilizados pela empresa, para o Filito, coesão ( $c$ ) = 15,5 kPa e  $\phi = 26,6^\circ$ , já o Filito da descontinuidade,  $c1 = 7 \text{ kPa}$  e  $\phi1 = 20^\circ$ ;  $c2 = 15,5 \text{ kPa}$  e  $\phi2 = 26,6^\circ$ . Assim, observa-se na Figura 39, a seção de ruptura crítica na zona de descontinuidade e percorrendo dois bancos. O fator de segurança (FS) resultante foi de 1,13, para o método GLE/Morgenstern & Price e 1,15 para Spencer. Portanto, como  $FS < 1,2$ ,

conclui-se que nas condições após o retaludamento, os valores estavam fora do estabelecido na NBR 11682 (ABNT, 2009), indicando instabilidade.

Com isso, foram inferidos valores baseados nas condições de ruptura aplicados na retroanálise. Para a segunda análise, as condições do Filito foram,  $c = 10$  kPa e  $\phi = 23^\circ$ , já o Filito da descontinuidade,  $c_1 = 7$  kPa e  $\phi_1 = 20^\circ$ ;  $c_2 = 10$  kPa e  $\phi_2 = 23^\circ$ . Com isso, é possível observar na Figura 40 a segunda análise, em que a seção de ruptura crítica manteve a mesma da primeira análise, porém, o fator de segurança diminuiu. Para o método GLE/Morgenstern & Price o FS foi de 0,95 e para Spencer de 0,97. Como ambos valores de FS são inferiores a 1, conclui-se que para os parâmetros adotados já são característicos para uma ruptura.

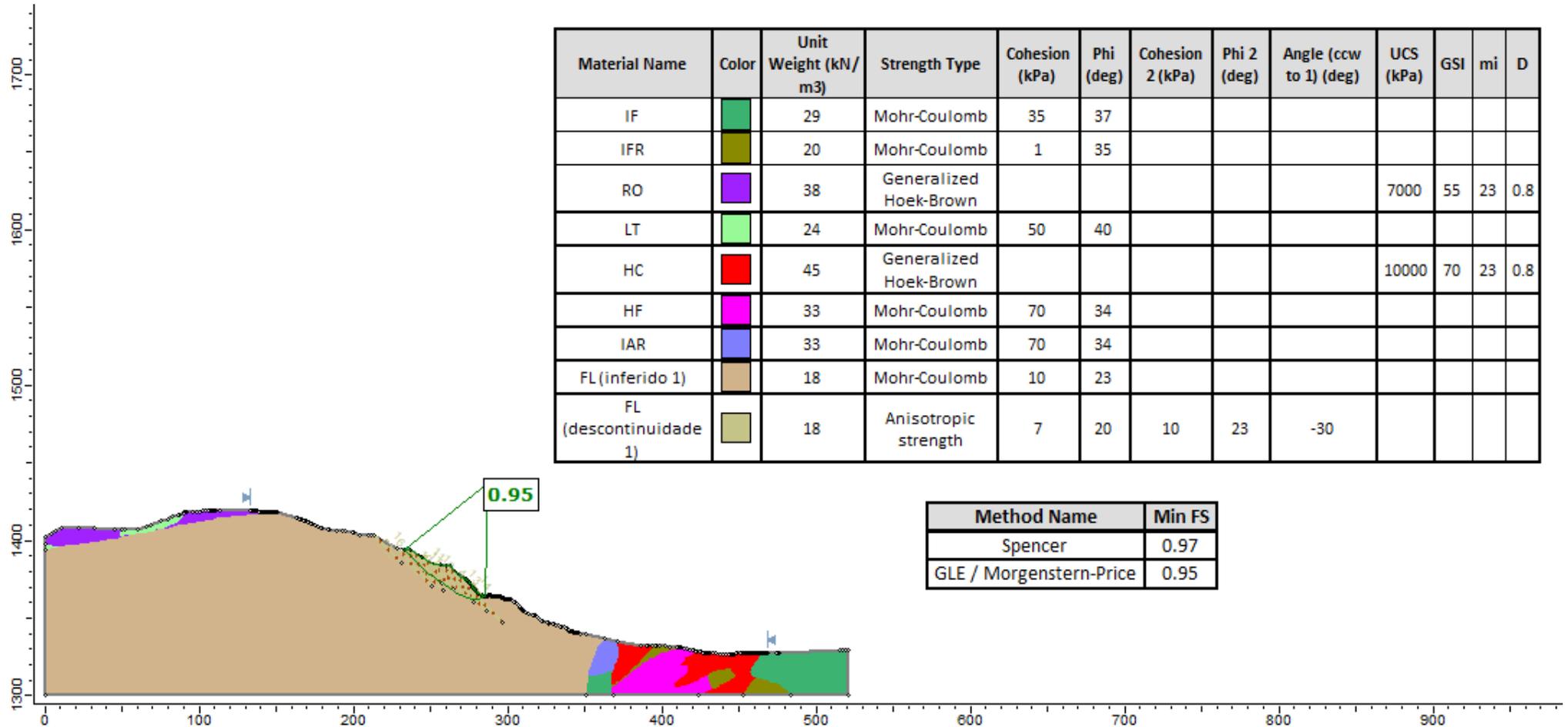
Por fim, foi aplicado as condições que caracterizou a ruptura de 2021. Assim, a terceira análise, representada na Figura 41, teve como parâmetros para o Filito de  $c = 7$  kPa e  $\phi = 20^\circ$  e para a descontinuidade de  $c_1 = 7$  kPa e  $\phi_1 = 20^\circ$ ;  $c_2 = 7$  kPa e  $\phi_2 = 20^\circ$ . O resultado da análise demonstrou a mesma seção crítica de ruptura das outras análises e o fator de segurança foi de 0,80 para GLE/Morgenstern & Price e 0,82 para Spencer. Tendo em vista que FS manteve abaixo de 1, confirma os resultados apresentados pela segunda análise. Ou seja, se as condições do talude da parede 2, chegarem nas condições propostas, haverá uma nova ruptura.

Figura 39: Resultados da primeira análise, seguindo parâmetros fornecidos pela empresa



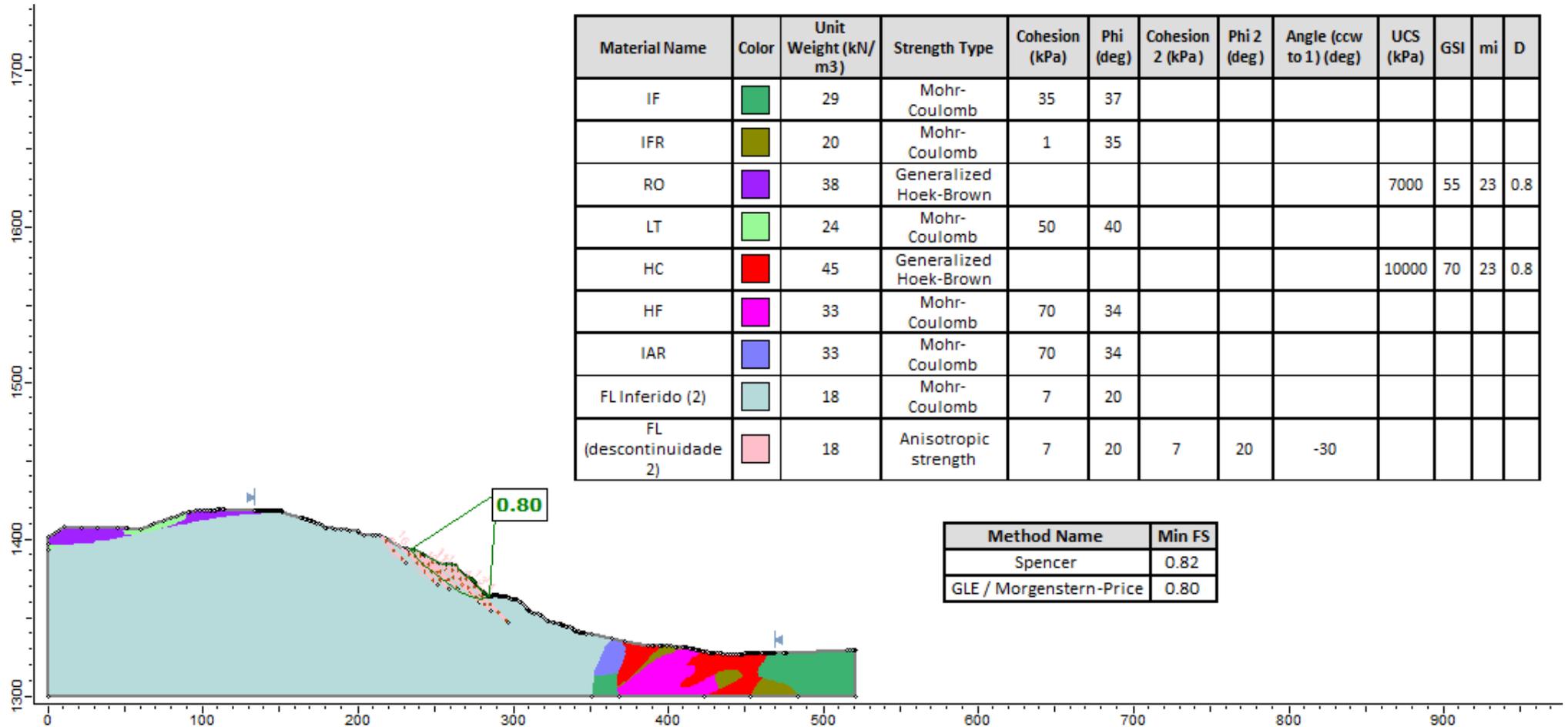
Fonte: Autor (2023)

Figura 40: Resultados da segunda análise, seguindo os parâmetros inferidos 1



Fonte: Autor (2023)

Figura 41: Resultados da terceira análise, seguindo os parâmetros inferidos 2



Fonte: Autor (2023)

### 6.3. MONITORAMENTO PARA O PÓS RETALUDAMENTO

As condições atuais do talude retaludado na parede 2, apresentou instabilidade quando foi submetido a análise com os parâmetros. Para os dados inferidos na retroanálise, os resultados do FS condizem com uma ruptura global, devido a zona crítica percorrer dois bancos da parede. Dessa forma, é necessário manter o monitoramento topográfico no local e continuar com as inspeções visuais em campo de forma que investigue surgências ou novas trincas nas bermas.

Se caso os novos prismas apresentarem comportamento de oscilações horizontais e verticais, como os registrados em 2021 (Figura 25), faz-se necessário uma visita em campo para confirmar a existência de anomalias ou caso exista degraus de abatimento. Em caso afirmativo, a melhor opção a seguir, é isolar a área por completo, principalmente as bermas abaixo de onde ocorre movimentação e do fundo da Cava Um. Dessa forma, diminuirá a exposição de riscos materiais e humanos.

## 7. CONCLUSÃO

No contexto da mineração, existem várias formas de explorar o minério, podendo variar a lavra entre céu aberto e subterrâneo, tendo em vista que as empresas escolhem a maneira que gera maiores quantidades de minério, comparado ao estéril. Por sua vez, o minério tem ficado cada vez mais distante da superfície, gerando desafios para o presente e futuro. Dessa forma, a engenharia geotécnica tem ganhado um papel importante no cenário da mineração, atuando em conjunto com equipes de operações e planejamento de mina, principalmente no que se refere a análise de estabilidade das estruturas geotécnicas.

O papel da geotecnia é garantir a segurança das estruturas da mina, respaldado por análises de estabilidade. Para o profissional realizar uma boa análise, deve juntar o conhecimento das condições do subsolo (ex: parâmetros de resistência), com as inspeções visuais em campo, para se inteirar da situação real da estrutura, caso exista alguma anomalia, como trincas ou surgências, que podem gerar processos de instabilidade.

Portanto, as principais conclusões deste trabalho foram:

- é fundamental realizar inspeções visuais em campo, para verificar anomalias na estrutura, bem como conhecer o subsolo, tendo referência se existem descontinuidades no local.
- o auxílio de softwares contribui com o desenvolvimento de projetos geotécnicos, o que permite a realização da análise de estabilidade mais rápida e eficiente, gerando menores chances de erro.
- o fator chuva, contribui significativamente para a evolução de processos de ruptura.
- o desconhecimento dos parâmetros de resistência do solo para material não drenado, prejudicam as análises de FS, uma vez que, para determinar o comportamento da estrutura em períodos chuvosos, é necessário inferir dados, muitas vezes destoando da realidade.
- obras como o retaludamento, são realizadas visando estabilização das estruturas. Mas, no caso apresentado por este estudo, o retaludamento foi ineficiente, uma vez que a estrutura não atingiu os parâmetros de segurança de estabilidade propostos pela NBR 11682 (ABNT, 2009).

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se que as análises de estabilidade sejam refeitas com parâmetros de resistência de material não drenado. Desse

modo, será possível compreender o comportamento da estrutura em períodos chuvosos. Recomenda-se também que sejam realizados furos de sondagem no local, para entender o comportamento da descontinuidade, uma vez que, ela foi determinante para a ruptura. Ademais, visando a estabilização dos taludes desta parede, sugere-se estudos de viabilidade para disposição de rejeito nesta cava, uma vez que o preenchimento não demandaria a construção de uma nova barragem, sendo esta uma das propostas que tem ganhado utilidade nos últimos anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, I.C.D. & MARQUES, E.A.G., **Introdução à Mecânica das Rochas**. Ed. UFV, 2006. 361 p.

CHÁCARA, D. M., **Correlação Entre Os Parâmetros Do Critério De Ruptura De Mohr-Coulomb E O Critério Generalizado De Hoek-Brown**. Dissertação de Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CORDERO, J. A. R., *et al.*, **Geological fault reactivation with discrete and distributed numerical models**. Conference: Proceedings of the XXXIV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), 2013.

CURI, A., **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

CURI, A., **Minas a céu aberto planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

REIS, F. A. G. V., **Geodinâmica Externa. Movimentos de massa**. 2021. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09.html>>. Acesso em 01 de março de 2023.

FABRÍCIO, J. V. F., **Análises Probabilísticas da Estabilidade de Taludes e Contenções**. Dissertação de Mestrado – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.

FERREIRA, J. L. F., **Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade do Porto – U. PORTO, Portugal, 2012

FIORI, A. P., **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GERSCOVICH, D. M.S., **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GEOSLOPE. The modeling software for geo-engineers and earth scientists. Versão 2018 R2. Disponível em: <<https://www.geoslope.com/>>. Acesso em: 16 de fevereiro de 2023.

GOOGLE. Google Earth website. Disponível em: <<http://earth.google.com>>. Acesso em: 08 de março de 2023.

HOEK, E., **Rock Mass Properties for Underground Mines. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)**. Littleton, Colorado, 2002.

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., & CORKUM, B., **Hoek–Brown failure criterion—2002 edition**. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, vol. 1, 2002, pp. 267 – 273.

HUDSON, J.A. & HARRISON, J.P., **Engineering rock mechanics, an introduction to the principles**. 2ª edição. 2000.

HUALLANCA, R. E. Z., **Mecanismos de Ruptura em Taludes Altos de Mineração a Céu Aberto**. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004.

INFANTI JR., N. & FORSANE FILHO, N.F., **Processos de dinâmica superficial**. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A., eds. Geologia de engenharia. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. p.131-152.

JAQUES, D. S., **Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos da Mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2014.

MARINOS, P. & HOEK, E., **GSI: A Geological Friendly Tool for Rock Mass Strength Estimation**. Proceedings of the GeoEng 2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne, 19-24 November 2000, 1422-1446.

MESQUITA, J. B., **Maciços Rochosos em Projetos Hidroelétricos: Proposta de Classificação Geomecânica**. Dissertação de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008.

MORGENSTERN, N R.; PRICE, V. E., **The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces**. Technical Notes, pp. 79-93, 1965.

OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. D., **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

OLIVEIRA, B. L. & PELAQUIM, F. G. P., **Fundamentos de mecânica das rochas**. Editora Saraiva, 2021.

PARRA, A. et al., **Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals.** International Journal of Mining, Reclamation and Environment, 2017.

PEREIRA, M. L., **ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE UMA SEÇÃO DE CAVA DE MINERAÇÃO E PILHA DE ESTÉRIL NO ESTADO DE MG.** Dissertação de Graduação, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2021.

PINTO, C. S., **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas/Carlos de Sousa Pinto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2000-02-15.

POMEROL, C. *et al.*, **Princípios da geologia: Técnicas, Modelos e Teorias.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

QUEIROZ, R. C., **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil.** São Paulo: Blucher, 2016

SILVA, V. C., **Desmonte de rochas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SPENCER, E., **A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces.** Géotechnique, 1967. 17(1): 11-26.

TERZAGHI, K., **Mechanisms of Landslides.** The Geological Society of America – Engineering Geology (Berkey), pp. 83-123, 1950.

VAZ, J. G. & CARNEIRO, V. A., **Escala de Mohs: O grau de dureza dos minerais dos estojos didáticos do acervo da SEGEP - Seção de Geologia e Paleontologia da UEG/CCET.** Revista Percurso, Anápolis, Goiás, 2015.

VARNES, D. J., **Slope movement types and processes.** In: Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, DC, 1978.