



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



ANDREY MEYER

**Análise da estabilidade global e proposta de retaludamento com resíduos de construção
e demolição (RCD) na Mina de Pirita, Ouro Preto (MG)**

Ouro Preto
2026

ANDREY MEYER

Análise da estabilidade global e proposta de retaludamento com resíduos de construção e demolição (RCD) na Mina de Pirita, Ouro Preto (MG)

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.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto

2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Andrey Meyer

Análise da estabilidade global e proposta de retaludamento com resíduos de construção e demolição (RCD) na mina de pirita, Ouro Preto (MG)

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 26 de fevereiro de 2026.

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dra - Tatiana Barreto dos Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - José Fernando Miranda - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 27/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/03/2026, às 21:55, 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, informando o código verificador **1068090** e o código CRC **86963327**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002704/2026-51

SEI nº 1068090

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

*Aos meus pais,
por todo o apoio e confiança,
nesta e em todas as etapas da minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amparo e proteção, por me guiar e conceder força, sabedoria e perseverança.

Aos meus pais, Paulo e Jussara, pelo mais puro amor e carinho, por me apoiarem e acreditarem no meu potencial, por me aconselharem e, ao mesmo tempo, confiarem em minhas escolhas, pelas orações e sacrifícios impostos pela distância e saudade, por serem meu porto seguro e por estarem comigo, sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, pela amizade, orientação e confiança ao longo da elaboração deste trabalho. À Prof^a. Dr^a. Tatiana Barreto dos Santos, pelo apoio, orientação, ensinamentos e auxílio na obtenção da licença educacional do software Slide2, utilizado nas análises.

À Rocscience, pelo fornecimento da licença educacional individual do Slide2, fundamental para o desenvolvimento das análises e estudos apresentados.

À Thalita, pelo companheirismo, motivação, incentivo e amor em todos os momentos, pelas orações, conversas diárias e por comemorar comigo cada passo e conquista, pelos pequenos gestos e por se fazer presente mesmo à distância.

Às amigas que construí ao longo dessa trajetória acadêmica, pela parceria, companheirismo, desafios enfrentados, conversas e risadas.

À UFOP, à Escola de Minas e aos professores, técnicos e demais funcionários do DEMIN, pelo ensino público de qualidade e pela estrutura e recursos disponibilizados. À Fundação Gorceix, pelo incentivo acadêmico e pelas oportunidades de crescimento e aprendizado proporcionadas.

Por fim, a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para esta conquista e para minha formação pessoal e profissional.

Deixo registrados meus mais sinceros agradecimentos!

RESUMO

A estabilidade de encostas constitui desafio relevante no contexto do fechamento de mina, especialmente quando associada a processos erosivos ativos e à ausência de intervenções de recuperação. Paralelamente, a geração expressiva de resíduos de construção e demolição (RCD) impõe desafios quanto à sua destinação adequada. A integração dessas demandas pode representar alternativa técnica voltada à reconfiguração geométrica para estabilização de taludes em áreas degradadas e reaproveitamento de materiais. Este trabalho teve como objetivo avaliar a estabilidade de uma encosta associada à antiga Mina de Pirita, no município de Ouro Preto (MG), analisando diferentes cenários de retaludamento com utilização de RCD, e buscando uma configuração geométrica alternativa que atenda a critérios de segurança geotécnica. A pesquisa foi desenvolvida a partir de dados bibliográficos e de um modelo digital tridimensional da área, a partir do qual foi definida uma seção representativa da encosta. As análises de estabilidade foram realizadas no software Slide2, que emprega formulações do Método do Equilíbrio Limite com discretização em fatias. Os parâmetros geotécnicos do solo e do RCD foram adotados com base na literatura técnica, sendo avaliados diferentes cenários geométricos de retaludamento e distintas condições hidráulicas. Os resultados indicaram que a geometria original da encosta e a projeção inicial das bancadas não atingiram o fator de segurança mínimo adotado ($FS \geq 1,5$) para condições de fechamento de mina, mesmo em cenários com menores valores de pressão neutra. A reconfiguração geométrica com redução da inclinação das bancadas para 30° e altura média de 5 m promoveu aumento significativo do fator de segurança, alcançando valores de até 1,68. A adição de uma camada superficial de 0,5 m de solo sobre o RCD elevou ainda mais a estabilidade, atingindo fator de segurança máximo de 1,99 nos cenários menos críticos. Entretanto, para valores elevados do parâmetro R_u ($\geq 0,7$), todos os cenários analisados apresentaram instabilidade, evidenciando a alta sensibilidade da encosta às condições de pressão neutra. Conclui-se que a alteração geométrica associada ao uso de RCD mostra-se tecnicamente viável para o retaludamento da área, desde que acompanhada de medidas complementares de controle hídrico, essenciais para garantir estabilidade a longo prazo em contexto de fechamento de mina.

Palavras-chave: Estabilidade de encostas; Resíduos de Construção e Demolição (RCD); Método do Equilíbrio Limite; Retaludamento; Fechamento de mina.

ABSTRACT

Slope stability constitutes a relevant challenge in the context of mine closure, especially when associated with active erosive processes and the absence of rehabilitation interventions. At the same time, the significant generation of construction and demolition waste (CDW) poses challenges regarding its proper disposal. The integration of these demands may represent a technical alternative aimed at geometric reconfiguration for slope stabilization in degraded areas and material reuse. This study aimed to evaluate the stability of a slope associated with the former Mina de Pirita, located in the municipality of Ouro Preto (MG), Brazil, by analyzing different slope reprofiling scenarios using CDW and seeking an alternative geometric configuration that meets geotechnical safety criteria. The research was developed based on bibliographic data and a three-dimensional digital model of the area, from which a representative slope cross-section was defined. Stability analyses were performed using the Slide2 software, which employs Limit Equilibrium Method formulations with slice discretization. The geotechnical parameters of the soil and CDW were adopted based on technical literature, and different geometric reprofiling scenarios and hydraulic conditions were evaluated. The results indicated that the original slope geometry and the initial bench configuration did not reach the minimum safety factor adopted ($FS \geq 1.5$) for mine closure conditions, even under scenarios with lower pore pressure values. The geometric reconfiguration with a reduction of bench inclination to 30° and an average height of 5 m significantly increased the safety factor, reaching values up to 1.68. The addition of a 0.5 m surface soil layer over the CDW further enhanced stability, resulting in a maximum safety factor of 1.99 under lower pore pressure conditions. However, for high values of the R_u parameter (≥ 0.7), all analyzed scenarios presented instability, highlighting the high sensitivity of the slope to pore pressure conditions. It is concluded that the geometric modification associated with the use of CDW is technically feasible for reprofiling the area, provided that complementary hydraulic control measures are implemented, which are essential to ensure long-term stability in a mine closure context.

Keywords: Slope stability; Construction and Demolition Waste (CDW); Limit Equilibrium Method; Slope reprofiling; Mine closure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, no município de Ouro Preto (MG).	2
Figura 2 – Etapas do ciclo de vida de uma mina e cenários de fechamento programado e fechamento prematuro.	6
Figura 3 – Concepção do Guia para Planejamento do Fechamento de Mina.	7
Figura 4 – Relação entre os conceitos de degradação, restauração, recuperação e reabilitação.	9
Figura 5 – Mapa geológico da região, destacando as unidades litoestratigráficas, a delimitação da área de estudo e a localização das amostras de Silveira (2020).	29
Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.	30
Figura 7 – Mapa topográfico da área de estudo com curvas de nível de equidistância vertical de 10 m, localização da seção analisada e das amostras de Silveira (2020).	35
Figura 8 – Detalhe da base da encosta na seção representativa da topografia atual da área. A) Seção original; B) Contato interpretado entre o material <i>in situ</i> e o RCD já depositado.	38
Figura 9 - Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{30} , $R_u = 0,7$	42
Figura 10 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{30} , $R_u = 0,3$	42
Figura 11 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{35} , $R_u = 0,7$	43
Figura 12 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{35} , $R_u = 0,3$	43
Figura 13 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{30} , $R_u = 0,7$	45
Figura 14 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{30} , $R_u = 0,3$	45
Figura 15 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{35} , $R_u = 0,7$	46
Figura 16 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{35} , $R_u = 0,3$	46
Figura 17 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{30} , $R_u = 0,7$	48
Figura 18 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{30} , $R_u = 0,3$	48
Figura 19 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{35} , $R_u = 0,7$	49
Figura 20 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{35} , $R_u = 0,3$	49
Figura 21 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,7$	51
Figura 22 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,5$	52
Figura 23 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,3$	52
Figura 24 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,7$	53
Figura 25 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,5$	54
Figura 26 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,3$	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de parâmetros geotécnicos reportados na literatura para RCD e materiais correlatos.	12
Tabela 2 – Compilação de parâmetros geotécnicos da literatura.	20
Tabela 3 – Equações satisfeitas em cada método de análise de estabilidade utilizado.	24
Tabela 4 – Características e relações das forças entre fatias em cada método de análise de estabilidade utilizado.	25
Tabela 5 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 1.....	41
Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 2.....	44
Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 3.....	47
Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 4.....	50
Tabela 9 – Variação dos Fatores de Segurança entre as condições inicial e final do talude....	57
Tabela 10 - Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 1: Geometria Original.	72
Tabela 11 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 2: Projeção de Geometria das Bancadas Existentes.....	73
Tabela 12 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 3: Nova Geometria Proposta.....	74
Tabela 13 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 4: Geometria Final.	75

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	vii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Problemática e Justificativa	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Fechamento de mina.....	5
2.1.1. Conceito e evolução do fechamento de mina	5
2.1.2. Diretrizes e boas práticas.....	6
2.1.3. Planejamento e segurança física no fechamento	8
2.1.4. Recuperação ambiental e monitoramento pós-fechamento	8
2.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	9
2.2.1. Definição e classificação dos RCD	10
2.2.2. Problemas ambientais e geotécnicos associados à disposição inadequada	11
2.2.3. Potencial de reutilização dos RCD na engenharia geotécnica.....	11
2.2.4. Propriedades físicas e mecânicas relevantes para análise de estabilidade.....	12
2.3. Estabilidade de taludes	13
2.3.1. Conceitos gerais de estabilidade de taludes.....	14
2.3.1.1. Fator de Segurança (FS)	14
2.3.2. Modos de ruptura em taludes	15
2.3.3. Fatores que influenciam a estabilidade.....	15
2.3.3.1. Medidas para aumento do Fator de Segurança.....	16

2.4. Parâmetros geotécnicos para análises de estabilidade	17
2.4.1. Resistência ao cisalhamento	17
2.4.2. Parâmetros físicos e de resistência	17
2.4.2.1. Peso específico (γ)	18
2.4.2.2. Peso específico das partículas sólidas (γ_s)	18
2.4.2.3. Índice de vazios (e)	18
2.4.2.4. Teor de umidade (w)	18
2.4.2.5. Coesão (c)	19
2.4.2.6. Ângulo de atrito (ϕ)	19
2.4.2.7. Valores de referência para os parâmetros geotécnicos	19
2.4.3. Parâmetro R_u	23
2.5. Métodos de análise de estabilidade e Software utilizado	23
2.5.1. Método do Equilíbrio Limite (MEL)	24
2.5.2. Métodos das Fatias	24
2.5.2.1. General Limit Equilibrium (GLE)	25
2.5.2.2. Spencer	25
2.5.2.3. Morgenstern-Price	25
2.5.2.4. Janbu Simplified	26
2.5.3. O Software Slide2	26
3. GEOLOGIA REGIONAL	28
3.1. Quadrilátero Ferrífero	28
3.1.1. Complexos Metamórficos	30
3.1.2. Supergrupo Rio das Velhas	31
3.1.3. Supergrupo Minas	31
3.1.3.1. Formação Cercadinho	31
3.1.3.2. Formação Fecho do Funil	32
3.1.3.3. Formação Taboões	32

3.1.3.4. Formação Barreiro	32
3.1.4. Supergrupo Estrada Real	32
3.1.4.1. Grupo Barbacena	32
3.1.4.2. Grupo Sabará	33
3.1.4.3. Grupo Itacolomi.....	33
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1. Seleção dos objetos de estudo	34
4.1.1. Uso do software Deswik.CAD para elaboração da seção	35
4.2. Análises de estabilidade no software Slide2.....	35
4.2.1. Considerações iniciais e definição dos métodos de análise.....	35
4.2.2. Definição de parâmetros dos materiais.....	36
4.2.3. Definição do parâmetro R_u	37
4.2.4. Definição do limite entre material “ <i>in situ</i> ” e RCD nas bancadas já feitas	38
4.2.5. Análises de estabilidade dos diferentes cenários.....	38
5. RESULTADOS	40
5.1. Cenário 1: Análise da geometria original	40
5.2. Cenário 2: Análise da projeção de geometria das bancadas existentes	43
5.3. Cenário 3: Análise da nova geometria proposta.....	46
5.4. Cenário 4: Análise da geometria final	49
6. DISCUSSÕES	55
6.1. Limitações metodológicas	55
6.2. Avaliação comparativa dos cenários analisados.....	55
6.3. Implicações práticas e estratégias complementares de estabilização	58
7. CONCLUSÕES.....	61
7.1. Sugestões de estudos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

APÊNDICE A – TABELAS COMPLETAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE	71
---	----

1. INTRODUÇÃO

A mineração exerce papel estratégico no desenvolvimento econômico e social, fornecendo matérias-primas essenciais à indústria e a obras de infraestrutura, contribuindo para o bem-estar das populações. No Brasil, destaca-se historicamente como atividade relevante, especialmente em regiões de tradição mineradora como Minas Gerais.

Contudo, a exploração mineral promove alterações significativas no meio físico, como modificações topográficas, hídricas e atmosféricas. As modificações impostas pela atividade mineradora podem resultar em passivos ambientais significativos, especialmente quando não há planejamento adequado para a etapa pós-operacional (Santos, 2017). Em minas abandonadas, taludes e encostas reconfiguradas permanecem suscetíveis a processos erosivos e instabilidades, representando riscos geotécnicos e ambientais. Segundo Griffith (1980) e Santos (2017), a recuperação natural dessas áreas é lenta e a intensificação da erosão pode resultar no desenvolvimento de ravinas e voçorocas. Diante desse cenário, a garantia da estabilidade física das estruturas remanescentes constitui etapa fundamental no fechamento de mina, visando à redução de riscos e à recuperação segura da área.

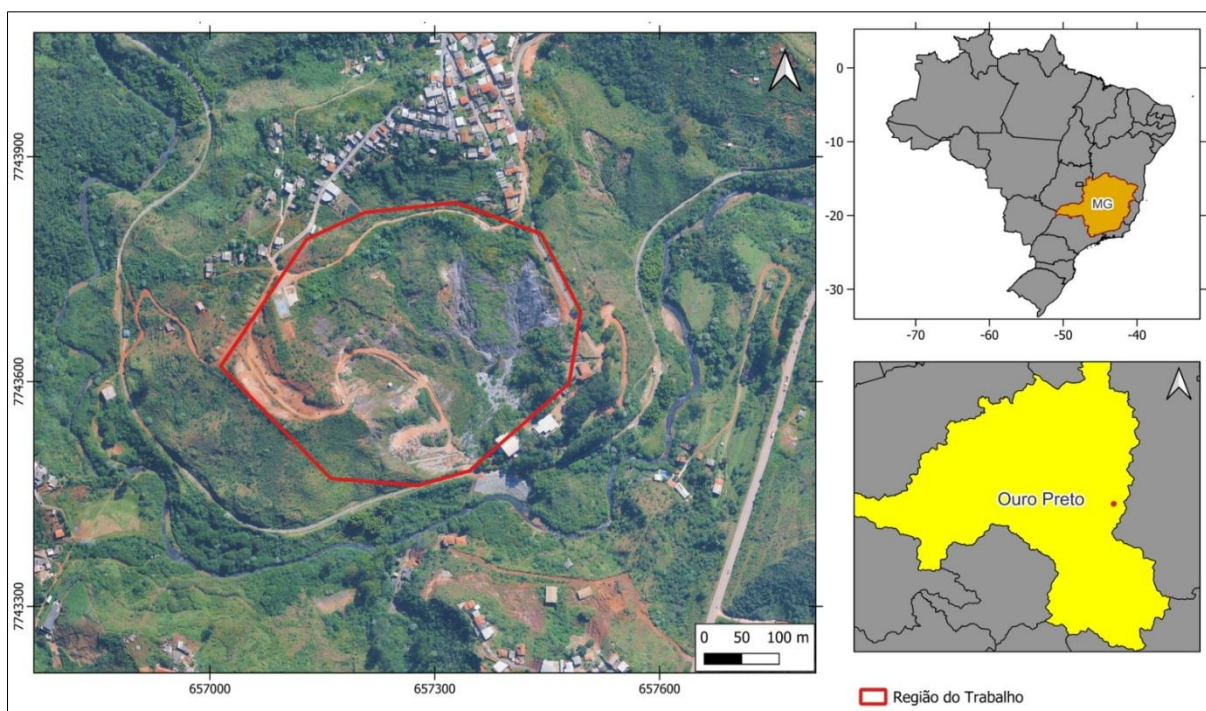
Assim como a mineração gera passivos ambientais associados à alteração do meio físico, o setor da construção civil também produz grandes volumes de resíduos que demandam destinação adequada. No Brasil, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) correspondem à parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos (Souza *et al.*, 1999), sendo frequentemente dispostos de forma irregular, o que contribui para a degradação ambiental, obstrução de drenagens e para o comprometimento de áreas urbanas (Gavilan & Bernold, 1994; Brito, 1998; Pinto, 1999). Embora apresentem potencial de reciclagem, a gestão desses materiais ainda constitui desafio técnico e ambiental em diversos municípios.

Nesse contexto, observa-se a coexistência de dois passivos distintos: áreas mineradas degradadas que demandam reabilitação física e elevados volumes de RCD que necessitam de destinação ambientalmente adequada. A combinação dessas demandas abre espaço para soluções conjuntas, especialmente em intervenções que envolvam reconfiguração geométrica e estabilização de encostas. Assim, a utilização de RCD como material em obras de estabilização de taludes pode representar uma solução integrada, conciliando segurança geotécnica e reaproveitamento de resíduos.

A área de estudo corresponde à denominada “Mina de Pirita”, localizada no município de Ouro Preto, Minas Gerais, inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1). A jazida foi explorada pela Empresa Mineira de Pirita Ltda. entre as décadas de

1930 e 1960, sendo na época considerada uma das mais relevantes do país, com reserva estimada em aproximadamente 10 milhões de toneladas de pirita (Lacourt, 1938). Sua produção esteve associada à obtenção de matéria-prima para fabricação de ácido sulfúrico, este utilizado para fins bélicos. Após a paralisação das atividades, atribuída a problemas operacionais, à queda no preço da pirita ao fim da Segunda Guerra Mundial e à ocorrência de instabilidades, a cava permaneceu sem medidas sistemáticas de recuperação. Atualmente, a área apresenta processos erosivos ativos e desenvolvimento de ravinas e voçorocas, configurando quadro de degradação ambiental. Além disso, a cava passou a integrar um contexto de disposição irregular de RCD (Moraes *et al.*, 2011), ao mesmo tempo em que, mais recentemente, vêm sendo iniciadas intervenções de retaludamento com a execução de bancadas utilizando esse material, inserindo a área em um processo de reconfiguração geométrica ainda em andamento.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, no município de Ouro Preto (MG).



Fonte: Autor.

Diante do contexto apresentado, este estudo propõe a avaliação da estabilidade de uma encosta associada à antiga Mina de Pirita, por meio de análises de estabilidade pelo Método do Equilíbrio Limite, realizadas no software Slide2. Serão considerados diferentes cenários geotécnicos, a partir da variação do parâmetro R_u , com o intuito de analisar a viabilidade de distintas geometrias de retaludamento. Avalia-se, ainda, a utilização de RCD como alternativa

técnica e ambiental para a reconfiguração da área, buscando a melhoria das condições de estabilidade global.

É importante enfatizar que o presente estudo possui caráter exploratório e baseia-se na utilização de parâmetros geotécnicos obtidos a partir da literatura técnica, em razão da limitação de dados experimentais específicos da área analisada. As geometrias consideradas correspondem a cenários hipotéticos elaborados para fins de avaliação da estabilidade da encosta, não representando necessariamente o projeto executivo adotado nas intervenções atualmente em curso. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados como indicativos do comportamento global da encosta, não possuindo caráter fiscalizatório ou avaliativo de obras específicas.

1.1. Problemática e Justificativa

A encosta associada à antiga Mina de Piritá apresenta evidências de instabilidade e processos erosivos ativos, reflexo da ausência histórica de medidas sistemáticas de recuperação após o encerramento das atividades. Nesse contexto, torna-se necessária a realização de avaliações de estabilidade que permitam estimar o comportamento global da encosta frente a diferentes cenários, buscando alternativas favoráveis de retaludamento.

Paralelamente, observa-se a coexistência de dois passivos ambientais distintos: a área minerada degradada, que demanda estabilização e reabilitação física, e os elevados volumes de RCD, cuja destinação inadequada gera impactos urbanos e ambientais. A possibilidade de utilização do RCD como material em intervenções de reconfiguração geométrica se apresenta como uma alternativa potencialmente integrada, capaz de associar mitigação de riscos geotécnicos ao reaproveitamento de resíduos.

Sob o ponto de vista científico e prático, o estudo contribui para a discussão sobre a aplicação de análises de estabilidade em áreas mineradas em processo de reabilitação, incorporando a avaliação de materiais alternativos em cenários geotécnicos distintos. Além disso, alinha-se aos princípios de sustentabilidade ao buscar integrar segurança geotécnica, reaproveitamento de resíduos e requalificação ambiental.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho estão estruturados em um objetivo geral, que define a finalidade principal da pesquisa, e em objetivos específicos, que estabelecem as etapas analíticas necessárias ao seu desenvolvimento.

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar a estabilidade global da encosta associada à antiga Mina de Piritá, por meio de análises de estabilidade pelo Método do Equilíbrio Limite no software Slide2 e parâmetros geotécnicos obtidos a partir da literatura técnica, considerando o cenário atual e a geometria decorrente das intervenções em curso, bem como propor uma configuração alternativa de retaludamento que atenda simultaneamente a critérios de segurança geotécnica e à viabilidade de utilização do RCD como material de reconfiguração da área.

1.2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos são definidos como os seguintes:

- 1) Selecionar e fundamentar parâmetros geotécnicos representativos dos materiais da encosta e do RCD, com base em referências bibliográficas, para utilização nas análises de estabilidade;
- 2) Realizar a análise de estabilidade da seção representativa da situação atual da encosta no software Slide2, determinando seu fator de segurança;
- 3) Simular a geometria correspondente às obras de retaludamento atualmente em execução, avaliando seu desempenho quanto à estabilidade;
- 4) Sugerir uma nova geometria de retaludamento, buscando atender a critérios mínimos de fator de segurança previamente estabelecidos;
- 5) Analisar a influência da variação do parâmetro R_u nos diferentes cenários modelados, avaliando a sensibilidade da encosta às condições de pressão neutra.
- 6) Comparar os resultados obtidos nos diferentes cenários analisados, verificando a efetividade da geometria proposta quanto à melhoria das condições de estabilidade global.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que fundamenta o presente estudo, abordando os principais conceitos relacionados ao fechamento de mina e à estabilidade de taludes em áreas mineradas. São discutidas as diretrizes e requisitos associados ao encerramento de empreendimentos minerários, bem como os fundamentos da análise de estabilidade aplicados a taludes. Também são apresentados aspectos referentes ao uso de resíduos de construção e demolição (RCD), aos parâmetros geotécnicos adotados nas análises e aos princípios do método de equilíbrio limite implementados no software Slide2, utilizado nas simulações deste trabalho.

2.1. Fechamento de mina

O fechamento de mina constitui uma etapa essencial do ciclo de vida de um projeto minerário, envolvendo o conjunto de ações técnicas, ambientais, sociais e econômicas destinadas à desativação segura das operações e à mitigação dos impactos decorrentes da atividade extrativa. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (Sánchez *et al.*, 2013), o fechamento deve ser planejado desde as fases iniciais do projeto, considerando a natureza temporária da mineração e a necessidade de garantir condições adequadas de estabilidade, segurança e uso futuro da área. De forma convergente, o *International Council on Mining and Metals* – ICMM (2025) destaca que o fechamento deve ser integrado ao planejamento ao longo de toda a vida útil da mina, incorporando gestão de riscos, definição de objetivos claros e monitoramento pós-fechamento, com vistas à promoção de um legado ambiental e social positivo.

2.1.1. Conceito e evolução do fechamento de mina

O fechamento de mina corresponde ao término das atividades de desativação de um empreendimento minerário, marcando a transição entre a fase operacional e o período pós-fechamento (Sánchez *et al.*, 2013). Esse encerramento pode ocorrer de forma programada, quando as atividades de produção se encerram conforme previsto no Plano de Fechamento, ou de forma prematura, quando a paralisação ocorre antes do previsto, geralmente em função de fatores econômicos, técnicos ou legais (Figura 2).

O planejamento de fechamento de mina constitui um processo progressivo, iniciado ainda nas etapas de concepção e implantação do empreendimento e desenvolvido ao longo de sua vida útil, visando o atendimento dos objetivos estabelecidos no Plano de Fechamento e à condução adequada do período pós-fechamento, no qual são realizadas ações de

monitoramento, manutenção e acompanhamento até o alcance das condições de estabilidade e segurança ideais (Sánchez *et al.*, 2013).

Figura 2 – Etapas do ciclo de vida de uma mina e cenários de fechamento programado e fechamento prematuro.



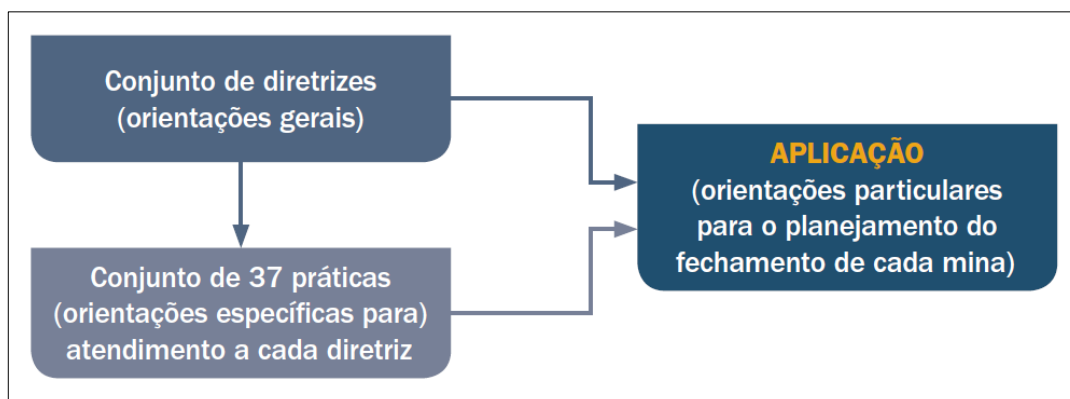
Fonte: Sánchez *et al.* (2013).

2.1.2. Diretrizes e boas práticas

O planejamento do fechamento de mina é orientado por diretrizes e boas práticas consolidadas em guias técnicos nacionais e internacionais, que estabelecem princípios para a condução segura, responsável e sustentável da desativação de empreendimentos minerários. No contexto brasileiro, destacam-se o Guia para Planejamento do Fechamento de Mina (Sánchez *et al.*, 2013), que apresenta diretrizes estruturantes e recomendações para a elaboração e atualização do Plano de Fechamento, e o Guia de Indicadores para Planejamento do Fechamento de Mina (IBRAM, 2024), que propõe instrumentos de avaliação do grau de implementação dessas práticas. Em âmbito internacional, o *Integrated Mine Closure – Good Practice Guide* (ICMM, 2025) reforça a integração do fechamento ao ciclo de vida da mina, incorporando a gestão de riscos, o engajamento de partes interessadas e a definição de objetivos claros, em alinhamento com princípios de governança ambiental, social e institucional (ESG) adotados no setor mineral.

O Guia para Planejamento do Fechamento de Mina (Sánchez *et al.*, 2013) estabelece sete diretrizes acompanhadas de recomendações de 37 boas práticas que orientam a estruturação do processo de fechamento ao longo da vida útil do empreendimento (Figura 3). De forma sintética, o documento orienta que o planejamento deve ter início ainda na concepção do projeto e ser aplicado também às minas em atividade, reforçando que o fechamento não constitui uma etapa isolada, mas um processo progressivo. Destaca-se, ainda, a necessidade de envolver partes interessadas internas e externas, registrar formalmente os resultados em planos e documentos específicos e estimar de forma abrangente os custos associados ao encerramento das operações. O guia também recomenda o acompanhamento do desenvolvimento socioeconômico local e determina que o plano de fechamento seja atualizado sempre que ocorrerem modificações substanciais no projeto da mina ou nas condições do entorno, evidenciando a natureza dinâmica e adaptativa do planejamento.

Figura 3 – Concepção do Guia para Planejamento do Fechamento de Mina.



Fonte: Sánchez *et al.* (2013).

Complementando essas diretrizes, o Guia de Indicadores para Planejamento do Fechamento de Mina (IBRAM, 2024) propõe um conjunto de indicadores destinados a avaliar o grau de implementação e a maturidade da gestão do fechamento nas empresas mineradoras. O documento sistematiza critérios de desempenho associados às diretrizes previamente estabelecidas, permitindo verificar a aderência às boas práticas e apoiar processos de melhoria contínua no planejamento e na condução do fechamento de mina.

Além disso, no cenário internacional, o guia publicado pelo ICMM (2025) trata o fechamento como um processo estratégico integrado à gestão do empreendimento, com foco na avaliação de riscos e na transição socioeconômica. Ele destaca a importância da relação entre desempenho técnico e responsabilidade socioambiental, inserindo o fechamento de mina

no contexto das práticas contemporâneas associadas aos princípios ambientais, sociais e de governança (ESG) no setor mineral.

2.1.3. Planejamento e segurança física no fechamento

O Plano de Fechamento de Mina (PFM) constitui o principal instrumento técnico que orienta as ações necessárias para a desativação do empreendimento, consolidando objetivos, medidas, cronogramas e estimativas de custos associados ao encerramento das atividades (Sánchez *et al.*, 2013). Trata-se de um documento dinâmico, elaborado desde as fases iniciais do projeto e continuamente aprimorado ao longo da operação, de modo a refletir as condições reais da mina e do seu entorno.

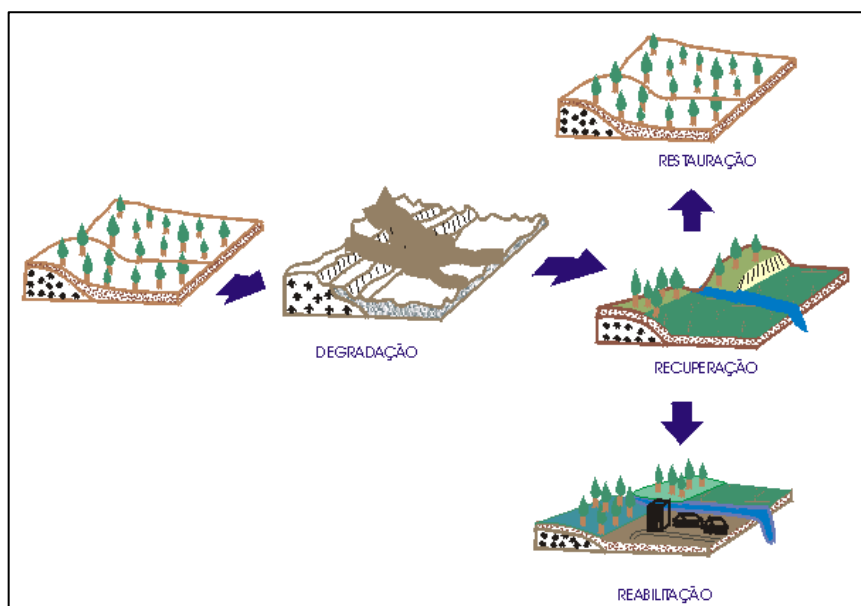
O planejamento deve considerar diferentes cenários de encerramento, incluindo o fechamento programado, o fechamento prematuro e eventuais períodos de suspensão das atividades, incorporando análises de risco e estratégias de mitigação (ICMM, 2025).

Entre os objetivos centrais do PFM destaca-se a garantia da segurança física das estruturas remanescentes e da área afetada pelas atividades minerárias, assumindo especial relevância a estabilidade geotécnica de taludes, cavas e demais estruturas, de modo a prevenir rupturas, movimentos de massa e processos erosivos que possam comprometer o meio ambiente e a segurança pública.

2.1.4. Recuperação ambiental e monitoramento pós-fechamento

A recuperação ambiental no contexto do fechamento de mina consiste na restituição de áreas degradadas a uma condição estável e utilizável (Sánchez *et al.*, 2013). A degradação, entendida como a perda da capacidade produtiva e funcional dos ecossistemas, pode envolver a remoção da camada fértil do solo, a alteração do regime hídrico e a supressão da vegetação nativa, reduzindo a resiliência ambiental. Nesse sentido, a recuperação não se limita à revegetação, mas compreende a recomposição topográfica, o restabelecimento das condições físicas e hidrológicas e a implantação de cobertura vegetal compatível com o uso futuro da área (Santos, 2017). Conforme discutido por Bitar & Braga (1995), os conceitos de degradação, restauração, recuperação e reabilitação apresentam distinções importantes (Figura 4), sendo que, no contexto minerário, a recuperação geralmente busca uma condição estável e funcional, ainda que distinta da situação original (Santos, 2017).

Figura 4 – Relação entre os conceitos de degradação, restauração, recuperação e reabilitação.



Fonte: Bitar & Braga (1995).

A definição do uso futuro orienta o grau de intervenção e os objetivos da recuperação, podendo envolver desde a reabilitação para fins produtivos até a destinação para conservação ambiental ou outros usos compatíveis com o entorno (Sánchez *et al.*, 2013; Santos, 2017). Logo, é necessário considerar as características físicas e ambientais do local, bem como as condições socioeconômicas do entorno, buscando compatibilidade entre segurança, viabilidade técnica e sustentabilidade de longo prazo (ICMM, 2025).

Após a implementação das medidas previstas no plano de fechamento, inicia-se o período de monitoramento pós-fechamento, durante o qual são avaliadas as condições de estabilidade, desempenho ambiental e atendimento aos critérios estabelecidos. O encerramento definitivo ocorre quando se comprovam o cumprimento desses objetivos e a consolidação das condições de segurança previstas (Sánchez *et al.*, 2013).

2.2. Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

Os resíduos de construção e demolição (RCD) estão diretamente relacionados às atividades construtivas e à dinâmica urbana. A seguir, são apresentados sua definição e classificação, os problemas associados à sua disposição inadequada, as possibilidades de reutilização na engenharia geotécnica e, por fim, as propriedades físicas e mecânicas relevantes para as análises desenvolvidas neste trabalho.

2.2.1. Definição e classificação dos RCD

Os RCD correspondem aos materiais gerados em atividades de construção, reforma, ampliação e demolição de edificações, bem como em obras de infraestrutura e serviços correlatos. No Brasil, sua definição e diretrizes de gerenciamento são estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 307/2002, que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil e estabelece critérios para sua classificação e destinação adequada (Brasil, 2002). De acordo com essa resolução, os RCD são classificados em quatro categorias:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como concreto, argamassa, blocos cerâmicos, solos provenientes de terraplenagem e componentes pré-moldados;
- Classe B: resíduos recicláveis para outras destinações, como plásticos, papel, papelão, metais, vidro e madeira;
- Classe C: resíduos para os quais ainda não há tecnologia economicamente viável para reciclagem;
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo construtivo, como tintas, solventes, óleos e materiais contaminados.

A geração de RCD está associada principalmente a duas fontes típicas: atividades de construção e de demolição. No Brasil, parcela significativa dos RCD é gerada em canteiros de obras e atividades de construção, incluindo perdas físicas inerentes ao processo construtivo (Souza *et al.*, 1999).

Do ponto de vista composicional, destaca-se a predominância da fração mineral nos RCD, constituída principalmente por concretos, argamassas, blocos cerâmicos, tijolos, telhas e solos. Diversos estudos indicam que essa fração pode representar aproximadamente 80 a 90% da massa total do resíduo, dependendo do tipo de obra e do contexto regional (Brito, 1998; Carneiro *et al.*, 2000). Essa característica confere aos RCD propriedades físicas mais próximas às de materiais granulares naturais, o que fundamenta seu potencial de reaproveitamento em aplicações geotécnicas. Entretanto, a composição dos RCD apresenta variabilidade significativa, em função das técnicas construtivas empregadas, dos materiais utilizados e da origem do resíduo (Pinto, 1986; Bossink & Brouwers, 1996).

É importante distinguir os RCD dispostos *in natura*, oriundos diretamente das atividades construtivas, dos chamados RCD reciclados (RCD-R), que passam por processos de triagem, britagem e eventual classificação granulométrica para obtenção de agregados reciclados (Di Maria *et al.*, 2018). A Resolução CONAMA nº 307/2002 define agregado reciclado como o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos da construção

civil com características técnicas adequadas à aplicação em obras de engenharia (Brasil, 2002). A literatura técnica concentra-se majoritariamente na caracterização de RCD-R, cujas propriedades físicas e mecânicas tendem a apresentar maior controle granulométrico e menor variabilidade quando comparadas ao material não beneficiado (Dhir *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019; Pourkhorshidi *et al.*, 2020; Oliveira & Santos, 2023). Essa distinção é relevante em estudos geotécnicos, uma vez que os parâmetros de resistência reportados para materiais reciclados podem não representar integralmente o comportamento de RCD utilizados sem processamento prévio.

2.2.2. Problemas ambientais e geotécnicos associados à disposição inadequada

Os RCD, quando dispostos de forma inadequada, podem gerar diversos impactos ambientais e geotécnicos. A deposição irregular em encostas, margens de cursos d'água e áreas urbanas contribui para degradação paisagística, proliferação de espécies de vetores patogênicos, tais como ratos, baratas, aranhas e escorpiões, além da obstrução de sistemas de drenagem e assoreamento de córregos e rios (Gavilan & Bernold, 1994; Brito, 1998; Pinto, 1999). Do ponto de vista geotécnico, a formação de depósitos heterogêneos e sem critérios técnicos pode resultar em maciços com comportamento mecânico incerto, favorecendo processos erosivos e instabilidades locais. Nesse contexto, o gerenciamento adequado dos RCD torna-se essencial para minimizar riscos e possibilitar sua utilização de forma tecnicamente controlada.

2.2.3. Potencial de reutilização dos RCD na engenharia geotécnica

Os RCD têm sido empregados em diversas obras de engenharia civil e geotécnica, principalmente como camadas de base e sub-base em pavimentos, onde atuam na distribuição de cargas (Lukiantchuki *et al.*, 2019; Athira & Kannan, 2023; Punetha & Nimbalkar, 2025); em aterros, contribuindo para a recuperação de áreas degradadas (Corrales *et al.*, 2023); e em estruturas de contenção e drenagem, proporcionando estabilidade e condução adequada das águas pluviais (Araújo *et al.*, 2020). Além disso, seu uso em regularização de terrenos permite nivelar áreas irregulares de maneira econômica e ambientalmente sustentável.

O aproveitamento dos RCD em obras geotécnicas apresenta diversas vantagens. Entre elas, destaca-se a boa capacidade drenante, especialmente quando o material é predominantemente granular, o que contribui para o escoamento de águas superficiais e reduz problemas de saturação. Além disso, a utilização de RCD pode representar significativa redução de custos, ao substituir parcialmente materiais convencionais e diminuir a necessidade do transporte de resíduos para aterros (Athira & Kannan, 2023). Sob a

perspectiva ambiental, esse aproveitamento favorece a sustentabilidade e a economia circular, promovendo a reutilização de materiais que, de outra forma, seriam descartados (Dhir *et al.*, 2004; Punetha & Nimbalkar, 2025).

Entretanto, apesar das vantagens, o uso de RCD exige atenção a fatores que podem comprometer seu desempenho em obras geotécnicas. Devido à diversidade de componentes, técnicas construtivas e origem dos resíduos, a alta variabilidade do material implica que suas propriedades mecânicas e hidráulicas nem sempre são previsíveis. Nessas condições, quando não é possível realizar a caracterização detalhada ou o processamento adequado do material, é recomendado adotar parâmetros geotécnicos mais conservadores, de modo a reduzir os riscos na aplicação geotécnica do RCD (Konstantopoulou & Spanou, 2013).

2.2.4. Propriedades físicas e mecânicas relevantes para análise de estabilidade

As propriedades físicas e mecânicas dos RCD são determinantes para sua aplicação em obras de engenharia geotécnica. Entre os parâmetros mais relevantes que aparecem na literatura destacam-se o peso específico (γ), a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ), os quais serão definidos com maiores detalhes e discutidos em relação à estabilidade de taludes no item 2.4. Entretanto, a alta variabilidade na composição e na granulometria desses materiais implica que os valores desses parâmetros apresentem grande dispersão. Essa heterogeneidade reforça a necessidade de cautela ao utilizar informações de estudos prévios, uma vez que cada lote de RCD pode exibir comportamento distinto. A Tabela 1 traz exemplos de valores médios, presentes em diferentes trabalhos da literatura, de parâmetros encontrados para RCD, RCD-R, resíduos sólidos em geral e materiais que possuem RCD em sua matriz.

Tabela 1 - Valores de parâmetros geotécnicos reportados na literatura para RCD e materiais correlatos.

Referência	Material	γ [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]
Konstantopoulou & Spanou, 2013	RCD de baixa compactação	15	-	0 a 5	32
Pourkhorshidi <i>et al.</i> , 2020	RCD	20,4	17,6 a 18,2	-	-
Athira & Kannan, 2023	RCD	21	18,2	14,7	36
Araújo <i>et al.</i> , 2020	RCD pós moagem (frações pedregulho, areia e argila)	19,3	16	-	-
Santos, 2007	RCD-R (fração pedregulho arenoso)	-	18,1	-	41

Referência	Material	γ [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	c [kPa]	ϕ [°]
Stark <i>et al.</i> , 2009	Resíduos sólidos	12,6; 17 (alta quantidade de RCD)	10,8 a 12,8	0 a 67	10 a 53
Remédio, 2014	Resíduos sólidos em aterro controlado	3,4 a 19,7	-	0 a 27	13,5 a 51
Gaspareto, 2017	Massa cerâmica com RCD e argila	16,7	-	-	-
Corrales <i>et al.</i> , 2023	RCD-R (remoção de plástico, metal, madeira, vidro e solo)	15,4 a 16,8	15,3 a 16,3	0 a 4	43 a 50
Oliveira & Santos, 2023	RCD-R (“areia marrom reciclada”, fração areia siltosa)	-	16,2	4,1 a 18; 23 (alto teor de solo de construção)	43
Sharma & Shrivastava, 2023	Massa de RCD-R com solo arenoso	-	17,2 a 19,9	13 a 61	39 a 71
Punetha & Nimbalkar, 2025	RCD-R (agregado de concreto reciclado)	-	17,8 a 21,7	44 a 170	41,5 a 57
Punetha & Nimbalkar, 2025	RCD-R (tijolos moídos reciclados)	-	19,5 a 19,8	41	49

Onde: γ = peso específico; γ_d = peso específico seco; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito.

Fonte: Autor.

Os valores apresentados evidenciam a ampla variabilidade dos parâmetros geotécnicos associados aos RCD, a qual está diretamente relacionada à composição do resíduo, à proporção de concreto, cerâmica e outros materiais, a granulometria e às condições de processamento. Essa dispersão dificulta a generalização de parâmetros representativos e reforça a necessidade de um posicionamento conservador na adoção de valores provenientes da literatura. Por fim, é importante reforçar que os dados compilados devem ser compreendidos como referências iniciais para análises preliminares, sendo recomendável, sempre que possível, a realização de avaliações específicas para o material a ser empregado. Tal abordagem contribui para uma interpretação mais segura do comportamento geotécnico dos RCD em aplicações práticas.

2.3. Estabilidade de taludes

A estabilidade de taludes refere-se à condição de equilíbrio entre as forças resistentes do material e as forças solicitantes atuantes na encosta, determinando a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa. No contexto de fechamento de mina, essa avaliação é fundamental para garantir segurança física e desempenho adequado das intervenções geométricas realizadas. A análise deve considerar os mecanismos de ruptura, propriedades e

parâmetros dos materiais envolvidos, e critérios de segurança estabelecidos na literatura técnica e em normas específica (Terzaghi *et al.*, 1996; ABNT, 2009).

2.3.1. Conceitos gerais de estabilidade de taludes

A estabilidade de taludes está associada ao equilíbrio entre as forças resistentes do material e as forças solicitantes atuantes ao longo de uma possível superfície de ruptura. As forças solicitantes estão relacionadas, principalmente, ao peso próprio do maciço e a carregamentos adicionais, enquanto as forças resistentes decorrem das propriedades geotécnicas do material, como coesão e ângulo de atrito interno. Quando as forças resistentes são suficientes para equilibrar as forças atuantes, o talude permanece estável. Entretanto, no caso das forças resistentes serem inferiores às atuantes, pode ocorrer ruptura (Terzaghi *et al.*, 1996; Fiori & Carmignani, 2009). A avaliação desse equilíbrio constitui a base das análises de estabilidade adotadas em projetos geotécnicos e em intervenções de reconfiguração geométrica de encostas (ABNT, 2009).

2.3.1.1. Fator de Segurança (FS)

O Fator de Segurança (FS) é definido como a razão entre as forças resistentes disponíveis ao longo de uma superfície potencial de ruptura e as forças solicitantes atuantes nessa mesma superfície (ABNT, 2009), podendo ser expresso de forma simplificada pela Equação 1.

$$FS = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Solicitantes}} \quad \text{Eq. 1}$$

Essa relação pode ser interpretada como a razão entre a resistência ao cisalhamento do material e a tensão cisalhante atuante (Terzaghi *et al.*, 1996; Fiori & Carmignani, 2009). O FS constitui, portanto, um indicador quantitativo da margem de segurança do talude.

Quando $FS > 1$, as forças resistentes superam as solicitantes, indicando condição estável. Para $FS = 1$, o sistema encontra-se na condição limite de equilíbrio, representando iminência de ruptura. Já para $FS < 1$, as forças solicitantes excedem as resistentes, caracterizando situação instável. A ABNT (2009) estabelece valores mínimos recomendados de Fator de Segurança conforme o nível de investigação e o grau de risco envolvido, sendo usual adotar valores superiores à unidade para garantir margem adequada de segurança.

No contexto do fechamento de mina e do presente trabalho, a adoção de critérios conservadores torna-se especialmente relevante, considerando o uso de parâmetros obtidos na literatura, a ausência de ensaios específicos na área estudada e as incertezas inerentes ao

RCD, aos materiais alterados e às áreas degradadas. Assim, é necessário incorporar uma margem adicional de segurança nos valores mínimos de FS, de modo a compensar possíveis variabilidades geotécnicas não quantificadas (ABNT, 2009).

2.3.2. Modos de ruptura em taludes

Os mecanismos de ruptura em taludes correspondem às diferentes formas geométricas e modos de deslocamento que uma massa de solo ou rocha pode assumir quando ocorre instabilidade. Eles estão associados às características do material, à geometria do talude e às condições de carregamento e drenagem (ABNT, 2009; Fiori & Carmignani, 2009).

Em relação à geometria e modo de movimento, a ruptura circular é caracterizada por uma superfície de deslizamento aproximadamente em forma de arco de circunferência, sendo comumente observada em solos homogêneos ou materiais altamente alterados. Já a ruptura não circular apresenta superfície de deslizamento com geometria irregular, podendo assumir formatos poligonais. Esse mecanismo é frequente em maciços heterogêneos ou estratificados, onde variações de resistência ao longo do perfil condicionam trajetórias de ruptura não circulares.

Quando é avaliada a extensão, uma ruptura global envolve a instabilização de toda a massa do talude, atingindo desde a crista até a base da encosta. Esse tipo de mecanismo é particularmente relevante em análises de estabilidade geral, pois compromete a integridade completa da estrutura geométrica. Já a ruptura de bancada ocorre de forma localizada, afetando apenas um segmento intermediário do talude, sem necessariamente comprometer ele por completo. É comum em taludes com múltiplas bancadas, como em áreas de mineração, podendo evoluir para mecanismos mais amplos caso não sejam adotadas medidas corretivas.

2.3.3. Fatores que influenciam a estabilidade

A estabilidade de taludes é condicionada por diversos fatores geométricos, geotécnicos e ambientais, que afetam diretamente o equilíbrio entre forças resistentes e mobilizadoras (Abramson *et al.*, 2002; ABNT, 2009; Fiori & Carmignani, 2009).

A geometria do talude exerce papel determinante na sua estabilidade. A altura e inclinação de bancadas, e largura de bermas influenciam a distribuição de tensões e a magnitude das forças mobilizadoras. Taludes mais altos e inclinados tendem a apresentar maiores esforços cisalhantes ao longo da superfície potencial de ruptura.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão, ângulo de atrito interno e peso específico, controlam a capacidade resistente do maciço. Materiais heterogêneos ou altamente intemperizados podem apresentar variabilidade significativa de comportamento.

A presença de água influencia a estabilidade por meio do aumento das pressões neutras e da redução das tensões efetivas no interior do maciço, diminuindo a resistência ao cisalhamento e favorecendo a ocorrência de rupturas, especialmente em períodos de elevada pluviosidade ou em situações com drenagem inadequada.

Além disso, carregamentos adicionais, como sobrecargas na crista do talude, deposição de materiais, vibrações e outras ações externas podem aumentar as forças mobilizadoras, reduzindo a margem de segurança do talude. A consideração desses fatores é indispensável em análises que envolvam áreas submetidas a intervenções antrópicas ou reconfiguração geométrica, como no caso de fechamento de mina.

2.3.3.1. Medidas para aumento do Fator de Segurança

A partir dos fatores que influenciam a estabilidade, diversas medidas podem ser adotadas com o objetivo de aumentar o FS de um talude. Essas intervenções buscam reduzir as forças mobilizadoras, ampliar a resistência disponível ou atuar simultaneamente em ambos os aspectos, conforme as características da área analisada e da disponibilidade de recursos (Abramson *et al.*, 2002; Fiori & Carmignani, 2009).

O retaludamento constitui uma das medidas mais empregadas, consistindo na redução da inclinação e, quando necessário, da altura do talude. A suavização da geometria reduz a componente tangencial do peso responsável por mobilizar o deslizamento. O aumento da largura de bermas também contribui para melhorar as condições de estabilidade, favorecendo a redistribuição de tensões e o controle de processos erosivos superficiais.

A implantação de sistemas de drenagem superficial e profunda é igualmente fundamental, especialmente em períodos de elevada pluviosidade e em áreas sujeitas à infiltração, auxiliando no controle da água e contribuindo para a manutenção da resistência do material.

Outra estratégia consiste na utilização de materiais com melhores propriedades geotécnicas. No contexto de reconfiguração geométrica, podem-se empregar materiais selecionados ou reaproveitados, de modo a garantir parâmetros de resistência compatíveis com os níveis de segurança desejados.

Por fim, quando as medidas geométricas e de drenagem não são suficientes, podem ser adotadas estruturas de contenção ou reforço, como muros de arrimo, solo reforçado ou sistemas de estabilização interna. São soluções que atuam no aumento da resistência global do sistema, indicadas para situações que demandam maior controle estrutural.

2.4. Parâmetros geotécnicos para análises de estabilidade

A análise de estabilidade de taludes fundamenta-se na adequada definição dos parâmetros geotécnicos que representam o comportamento mecânico e hidráulico dos materiais envolvidos. Esses parâmetros são responsáveis por descrever as condições de resistência ao cisalhamento, o peso próprio do maciço e a influência da presença de água nos vazios, constituindo variáveis essenciais para a determinação do FS (Duncan *et al.*, 2014). A escolha adequada desses valores, obtidos por ensaios, investigações de campo ou literatura técnica, é fundamental para a confiabilidade das análises de estabilidade.

2.4.1. Resistência ao cisalhamento

A resistência ao cisalhamento corresponde à capacidade do solo ou material geotécnico de resistir às tensões tangenciais atuantes ao longo de um plano potencial de ruptura. Essa resistência resulta da combinação entre a parcela de coesão do material e o atrito interno entre as partículas, sendo função do estado de tensões efetivas (Terzaghi *et al.*, 1996; Fiori & Carmignani, 2009; Duncan *et al.*, 2014).

Nas análises de estabilidade de taludes em solos, a resistência ao cisalhamento é usualmente representada pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb, que estabelece uma relação linear entre a tensão cisalhante resistente e a tensão normal efetiva atuante no plano de ruptura (Labuz & Zang, 2012), representada pela Equação 2.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

τ = tensão cisalhante resistente;

c' = coesão efetiva;

σ' = tensão normal efetiva;

φ' = ângulo de atrito efetivo.

Considerando que o presente estudo envolve solo de alteração de filitos e xistos, e RCD, materiais com comportamento predominantemente granular ou terroso, a adoção do critério de Mohr-Coulomb mostra-se adequada e amplamente empregada em análises de estabilidade dessa natureza (Abramson *et al.*, 2002; Labuz & Zang, 2012).

2.4.2. Parâmetros físicos e de resistência

Os parâmetros físicos e de resistência caracterizam o estado e o comportamento mecânico dos materiais que compõem o maciço, sendo utilizados como variáveis de entrada

nas análises de estabilidade. Esses parâmetros definem as condições de carregamento e a capacidade resistente consideradas nos modelos geotécnicos (Duncan *et al.*, 2014). A seguir, os principais parâmetros utilizados neste trabalho são detalhados, com base em Pinto (2006) e Fernandes (2016).

2.4.2.1. Peso específico (γ)

O peso específico (γ) é definido como o peso do material por unidade de volume, sendo expresso em kN/m³. Esse parâmetro representa o efeito do peso próprio do maciço, influenciando diretamente as tensões atuantes no interior do talude.

O peso específico natural pode ser relacionado ao peso específico seco (γ_d) e ao teor de umidade (w), pela Equação 3, ou então ser expresso em função do peso específico das partículas sólidas (γ_s) e do índice de vazios (e), através da Equação 4 (Fernandes, 2016).

$$\gamma = \gamma_d (1 + w) \quad \text{Eq. 3}$$

$$\gamma = \gamma_s \left(\frac{1 + w}{1 + e} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

2.4.2.2. Peso específico das partículas sólidas (γ_s)

O peso específico das partículas sólidas (γ_s) corresponde ao peso dos sólidos por unidade de volume de sólidos, excluindo-se os vazios e sendo expresso em kN/m³. Trata-se de um parâmetro físico intrínseco ao material, independente do arranjo estrutural ou do teor de umidade.

Esse parâmetro é utilizado nas relações de estado, especialmente nos cálculos que envolvem índice de vazios, grau de saturação e peso específico natural, sendo importante para a correta caracterização física do material nas análises geotécnicas.

2.4.2.3. Índice de vazios (e)

O índice de vazios (e) é um parâmetro adimensional que representa a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos de um material, indicando seu grau de compactidade. Esse parâmetro tem relação com a porosidade, além de influenciar o peso específico, a deformabilidade e o comportamento resistente do solo.

2.4.2.4. Teor de umidade (w)

O teor de umidade (w) é um parâmetro adimensional definido como a relação entre a massa de água e a massa de sólidos do material. Esse parâmetro influencia o peso específico e

o comportamento mecânico do solo, afetando as tensões efetivas e, conseqüentemente, sua resistência ao cisalhamento. É um parâmetro de fácil determinação, através do ensaio de secagem em estufa, por exemplo.

2.4.2.5. Coesão (c)

A coesão (c) representa a parcela da resistência ao cisalhamento independente da tensão normal atuante no plano de ruptura. Esse parâmetro está associado a forças de cimentação, ligações físico-químicas entre partículas ou, em alguns casos, a efeitos aparentes decorrentes da sucção em solos parcialmente saturados.

A coesão é usualmente obtida por ensaios de cisalhamento direto ou ensaios triaxiais, sendo um dos parâmetros fundamentais do critério de Mohr-Coulomb. Nas análises de estabilidade realizadas em softwares de equilíbrio limite, como o Slide2, a coesão atua diretamente na definição da resistência mobilizada ao longo da superfície potencial de ruptura.

2.4.2.6. Ângulo de atrito (ϕ)

O ângulo de atrito interno (ϕ) representa a resistência decorrente do atrito entre as partículas do material. Esse parâmetro controla o aumento da resistência ao cisalhamento com o acréscimo da tensão normal efetiva.

Assim como a coesão, o ângulo de atrito é determinado por ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais. Em análises de estabilidade de taludes, esse parâmetro exerce influência significativa no FS, especialmente em materiais granulares, como solos arenosos e RCD.

2.4.2.7. Valores de referência para os parâmetros geotécnicos

Com o objetivo de subsidiar as análises de estabilidade desenvolvidas neste trabalho, foram levantados na literatura técnica valores representativos dos parâmetros físicos e de resistência aplicáveis a solos alterados similares ao da região de estudo. A Tabela 2 apresenta a síntese dos valores identificados, bem como suas respectivas fontes.

Tabela 2 – Compilação de parâmetros geotécnicos da literatura.

Referência	Classificação geológica (litologia)	Material	γ [kN/m³]	γ_d [kN/m³]	γ_s [kN/m³]	e	w [%]	c [kPa]	ϕ [°]
Vargas, 1978	-	Solo residual compacto	-	-	-	0,43 a 1	-	-	-
Lambe & Whitman, 1979	-	Areia siltosa	-	13,7 a 20	-	0, a 0,9	-	-	-
Lambe & Whitman, 1979	-	Areia com mica	-	11,8 a 18,6	-	0,4 a 1,2	-	-	-
Terzaghi & Peck, 1986	-	Areia graduada “solta”	19,5	15,6	-	0,7	25	-	-
Terzaghi & Peck, 1986	-	Areia graduada “densa”	21,2	18,2	-	0,4	16	-	-
Das, 2007	-	Areia siltosa “fofa”	-	16	-	0,6	25	-	-
Das, 2007	-	Areia siltosa “compacta”	-	19	-	0,4	15	-	-
Joppert Jr., 2007	-	Areias/Solos arenosos	17,7 a 19,6	-	-	-	-	-	30 a 45
Joppert Jr., 2007	-	Areia pouco siltosa	16,7 a 19,6	-	-	-	-	-	25 a 38
Parizzi <i>et al.</i> , 2011	Formação Fecho do Funil (filitos)	Solo de matriz rica em silte e areia	19	15,3	28,2	0,8	-	15	13
Parizzi <i>et al.</i> , 2011	Grupo Sabará (filitos/xistos)	Solo de matriz rica em silte e areia	14,5 a 21	13	27	1,1	-	21	38
Ávila, 2012	Grupo Sabará (filitos)	-	14,2	-	-	-	-	-	-

Referência	Classificação geológica (litologia)	Material	γ [kN/m³]	γ_d [kN/m³]	γ_s [kN/m³]	e	w [%]	c [kPa]	ϕ [°]
Silva <i>et al.</i> , 2018	-	Colúvio, solo residual de filito, siltoso	17,5 a 20,7	-	26,9 a 35,7	-	18,2 a 37,7	0 a 49,2	19 a 25,6
Tavares <i>et al.</i> , 2018	Grupo Sabará (filitos/xistos)	Aterro (argila arenosa)	-	-	-	-	-	19	27
Tavares <i>et al.</i> , 2018	Grupo Sabará (filitos/xistos)	Solo residual maduro (silte argiloso)	-	-	-	-	-	19	28
Tavares <i>et al.</i> , 2018	Grupo Sabará (filitos/xistos)	Saprólito de granitóide (silte arenoso)	-	-	-	-	-	28	35
Silva <i>et al.</i> , 2020	Formação Gandarela (filitos)	Solo residual de filito	15,9	-	29,4	-	46,5	29,8	22,1
Silva <i>et al.</i> , 2020	Formação Gandarela (filitos)	Filito muito alterado	18,5	-	29,4	-	29,2	57,5	27,1
Silveira, 2020	Formação Fecho do Funil/Grupo Sabará (filitos/xistos)	Solo arenoso, areia fina siltosa	-	-	26,7	-	4,8	25	35,4
Honorato, 2021	Formação Cercadinho (filitos)	-	-	-	-	-	-	-	17,1
Rodrigues <i>et al.</i> , 2023	Formação Fecho do Funil (filitos)	Saprólito siltoso	-	13 a 13,8	29,3 a 29,8	1,2 a 1,3	33,5 a 40,3	5,8 a 13,7	30 a 33
Rodrigues <i>et al.</i> , 2023	Formação Fecho do Funil (filitos)	Solo residual de filito dolomítico,	-	12,4 a 13	27,8 a 28,4	1,3	34,8 a 40,3	26,4 a 33	26 a 27
Rodrigues <i>et al.</i> , 2023	Formação Fecho do Funil (filitos)	Solo residual mole de filito dolomítico	-	11,1 a 12,5	26,6 a 27,7	1,2 a 1,4	46,3 a 53,6	27 a 54	14 a 26
Souza <i>et al.</i> , 2024	Supergrupos Minas e Rio das Velhas (filitos)	Solo residual de filito	-	-	-	-	-	20 a 40	20 a 40

Referência	Classificação geológica (litologia)	Material	γ [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	γ_s [kN/m ³]	e	w [%]	c [kPa]	ϕ [°]
Garcia & Iyomasa, 2025	Formação Serra de Itaberaba/SP (filitos)	Solo residual de filito	16,9 a 19,2	-	26,6 a 29	0,6 a 1,5	17,4 a 43,9	0 a 71,5	22 a 41
Oliveira <i>et al.</i> , 2025	Grupo Sabará (filitos)	-	-	-	29,7	-	22,4	0 a 11	39,2 a 42,5
Oliveira <i>et al.</i> , 2025	Grupo Piracicaba (filitos)	-	-	-	30,6	-	19	23	32
Souza, 2025	Formação Cercadinho (filitos)	Colúvio, aeia siltosa	27,4	-	-	-	-	2,5	29,8

Onde: γ = peso específico; γ_d = peso específico seco; γ_s = peso específico das partículas sólidas; e = índice de vazios; w = teor de umidade; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito.

Fonte: Autor.

2.4.3. Parâmetro R_u

O parâmetro R_u foi introduzido no contexto das análises clássicas de estabilidade de taludes, sendo amplamente empregado em ábacos desenvolvidos por Bishop & Morgenstern (1960) para representar, de forma simplificada, as condições de pressão neutra. Em termos matemáticos, o parâmetro é definido como na Equação 5:

$$R_u = \frac{u}{\gamma z} \quad \text{Eq. 5}$$

Nessa equação, u corresponde à pressão neutra no ponto considerado, γ é o peso específico do solo e z é a profundidade abaixo da superfície do terreno, de modo que γz representa a tensão vertical total. Assim, o R_u expressa a razão entre a pressão neutra e a tensão vertical atuante no maciço Bishop & Morgenstern, 1960; Seequent Limited, 2022).

Fisicamente, o R_u indica qual fração da tensão vertical total está sendo suportada pela água nos vazios do solo. Quando $R_u = 0$, admite-se ausência de pressão neutra atuante, situação típica de condições secas ou sem influência de água. À medida que o valor de R_u aumenta, maior parcela da tensão total passa a ser transmitida pela água, reduzindo a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do solo. Valores elevados de R_u estão, portanto, associados a condições mais críticas de estabilidade.

Em análises de estabilidade por equilíbrio limite, o R_u é utilizado pela sua simplicidade de aplicação, permitindo incorporar o efeito das pressões neutras de forma direta (Seequent Limited, 2022). Entretanto, por se basear na adoção de um valor constante, o R_u não representa adequadamente variações espaciais reais das pressões neutras no maciço.

Dessa forma, o emprego do parâmetro R_u deve ser entendido como uma simplificação das condições hidráulicas. Sua utilização mostra-se adequada em estudos preliminares ou em análises comparativas, desde que suas limitações sejam reconhecidas e que o valor adotado seja compatível com as características do solo e da situação analisada (Seequent Limited, 2022).

2.5. Métodos de análise de estabilidade e Software utilizado

A análise de estabilidade de taludes pode ser realizada por diferentes abordagens, dentre as quais se destacam os métodos baseados no equilíbrio limite e os métodos numéricos. No presente trabalho, adotou-se o Método do Equilíbrio Limite (MEL), amplamente empregado na prática da engenharia geotécnica e implementado em softwares especializados.

A seguir, são apresentados os fundamentos do MEL, os métodos das fatias utilizados nas análises e o software empregado no desenvolvimento do estudo.

2.5.1. Método do Equilíbrio Limite (MEL)

O MEL é uma das abordagens mais utilizadas na análise de estabilidade de taludes. O método permite determinar o Fator de Segurança (FS) por meio do equilíbrio entre forças e/ou momentos atuantes na massa potencialmente instável, comparando as ações que promovem o deslizamento com as resistências mobilizadas ao longo de uma superfície de ruptura assumida (Krahn, 2003; Seequent Limited, 2022).

Ele se baseia na hipótese de que o maciço se encontra na iminência da ruptura, admitindo-se o equilíbrio estático ao longo da superfície crítica. A resistência do solo é normalmente representada por meio dos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), e sua ampla aplicação deve-se à simplicidade conceitual e à facilidade de implementação computacional, sendo amplamente incorporado em softwares especializados (Seequent Limited, 2022).

2.5.2. Métodos das Fatias

No contexto do MEL, os métodos das fatias constituem as formulações mais utilizadas para a determinação do FS. Nessa abordagem, a massa potencialmente instável é discretizada, isto é, subdividida em elementos verticais, permitindo a aplicação das equações de equilíbrio em cada fatia e na massa como um todo (Fellenius, 1936). Os diferentes métodos das fatias distinguem-se principalmente pelas hipóteses adotadas em relação ao equilíbrio de forças e momentos e ao tratamento das forças de interação entre as fatias, como é sintetizado nas Tabelas 3 e 4. Apesar dessas diferenças, tais métodos são amplamente aceitos e consolidados na prática da engenharia geotécnica. A seguir serão discutidos brevemente os métodos utilizados no presente trabalho.

Tabela 3 – Equações satisfeitas em cada método de análise de estabilidade utilizado.

Método	Equilíbrio de forças	Equilíbrio de momentos
GLE	Sim	Sim
Spencer	Sim	Sim
Morgenstern-Price	Sim	Sim
Janbu Simplified	Sim	Não

Fonte: Adaptado de Seequent Limited (2022).

Tabela 4 – Características e relações das forças entre fatias em cada método de análise de estabilidade utilizado.

Método	Força Normal entre fatias (E)	Força de cisalhamento entre fatias (X)	Inclinação da força resultante (X/E)
GLE	Sim	Sim	Variável (função arbitrária)
Spencer	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Sim	Sim	Variável (função arbitrária)
Janbu Simplified	Sim	Não	Horizontal

Fonte: Adaptado de Seequent Limited (2022).

2.5.2.1. General Limit Equilibrium (GLE)

O método *General Limit Equilibrium* (GLE) é uma formulação geral dos métodos das fatias que satisfaz simultaneamente as equações de equilíbrio de forças e de momentos da massa potencialmente instável (Fredlund & Krahn 1977; Fredlund *et al.*, 1981). O método admite uma função arbitrária para representar a distribuição das forças de interação entre as fatias, conferindo flexibilidade à análise.

A solução é obtida de forma iterativa, buscando um único FS que atenda às condições de equilíbrio global. A formulação do GLE fornece base para discutir, descrever e compreender todos os outros métodos, sendo considerado uma formulação abrangente e amplamente implementada em softwares de estabilidade (Seequent Limited, 2022).

2.5.2.2. Spencer

O método de Spencer é uma formulação dos métodos das fatias que satisfaz simultaneamente as equações de equilíbrio global de forças e de momentos da massa potencialmente instável. Nesse método, assume-se que a inclinação das forças de interação entre as fatias é constante ao longo de toda a superfície de ruptura (Spencer, 1967).

A solução é obtida determinando-se um único FS que atenda às condições de equilíbrio estabelecidas. Por satisfazer integralmente o equilíbrio estático e apresentar formulação consistente, o método de Spencer é considerado mais rigoroso. Ainda assim, também é amplamente utilizado em análises de estabilidade (Seequent Limited, 2022).

2.5.2.3. Morgenstern-Price

Desenvolvido por Morgenstern & Price (1965), o método de Morgenstern-Price é uma formulação dos métodos das fatias que, da mesma forma que as anteriores, satisfaz simultaneamente as equações de equilíbrio global de forças e de momentos da massa potencialmente instável.

O método considera explicitamente as forças normais e tangenciais de interação entre as fatias e, assim como o GLE, permite a adoção de uma função arbitrária para descrever a distribuição de tais forças. Essa flexibilidade na modelagem das forças entre fatias contribui para sua ampla utilização em análises computacionais de estabilidade (Morgenstern & Price, 1965; Seequent Limited, 2022).

2.5.2.4. Janbu Simplified

O método de Janbu Simplified é uma formulação dos métodos das fatias baseada na discretização da massa potencialmente instável em elementos verticais. Nessa abordagem, são consideradas as forças normais de interação entre as fatias, enquanto as forças tangenciais (cisalhantes) interlaminares são desprezadas. Dessa forma, diferentemente dos métodos que satisfazem simultaneamente o equilíbrio de forças e de momentos, o Janbu Simplified não atende explicitamente à condição de equilíbrio global de momentos (Janbu, 1954).

Em razão dessa simplificação, o método apresenta formulação menos rigorosa, podendo gerar valores de FS ligeiramente distintos daqueles obtidos por métodos completos. Ainda assim, sua simplicidade de aplicação justifica seu uso em análises preliminares e comparativas (Seequent Limited, 2022).

2.5.3. O Software Slide2

O Slide2, desenvolvido pela Rocscience, é um software amplamente utilizado para análises bidimensionais de estabilidade de taludes com base no Método do Equilíbrio Limite. A ferramenta é amplamente aplicada em projetos geotécnicos e de mineração, pois permite a modelagem de geometrias complexas, múltiplos materiais, bem como a consideração das pressões neutras por meio de diferentes condições hídricas, incluindo a utilização do parâmetro R_u .

O software implementa diferentes formulações do MEL, incluindo os métodos GLE/Morgenstern-Price, Spencer e Janbu. Essas formulações permitem a determinação do FS por meio do equilíbrio das forças e/ou momentos atuantes na massa potencialmente instável, conforme as hipóteses específicas de cada método (Janbu, 1954; Morgenstern & Price, 1965; Spencer, 1967; Fredlund & Krahn 1977). No presente estudo, tais métodos foram empregados para avaliação comparativa da estabilidade de uma encosta formada por solo de alteração de filito/xisto e do material de RCD utilizado em seu retaludamento.

Além disso, o Slide2 permite a consideração simplificada das pressões neutras por meio do parâmetro R_u , possibilitando a análise de diferentes cenários de saturação do maciço (Seequent Limited, 2022). O software realiza a busca automática de superfícies potenciais de

ruptura, que podem assumir geometrias circulares ou não circulares, conforme definido pelo usuário, permitindo a identificação da superfície crítica associada ao menor FS. A ferramenta possibilita ainda a modelagem estratigráfica do maciço, com atribuição de diferentes parâmetros geotécnicos a materiais distintos, como no caso do solo de alteração subjacente e do material de RCD empregado no retaludamento.

Quanto à nomenclatura apresentada na interface do programa, a opção “GLE/Morgenstern-Price” corresponde à implementação da formulação geral de equilíbrio limite baseada na abordagem de Morgenstern-Price, inserida no contexto do *General Limit Equilibrium*. Já o método apresentado como “Janbu Corrected” refere-se ao Janbu Simplified com aplicação automática de um fator de correção empírico ao FS, visando reduzir as imprecisões decorrentes da não satisfação do equilíbrio global de momentos.

3. GEOLOGIA REGIONAL

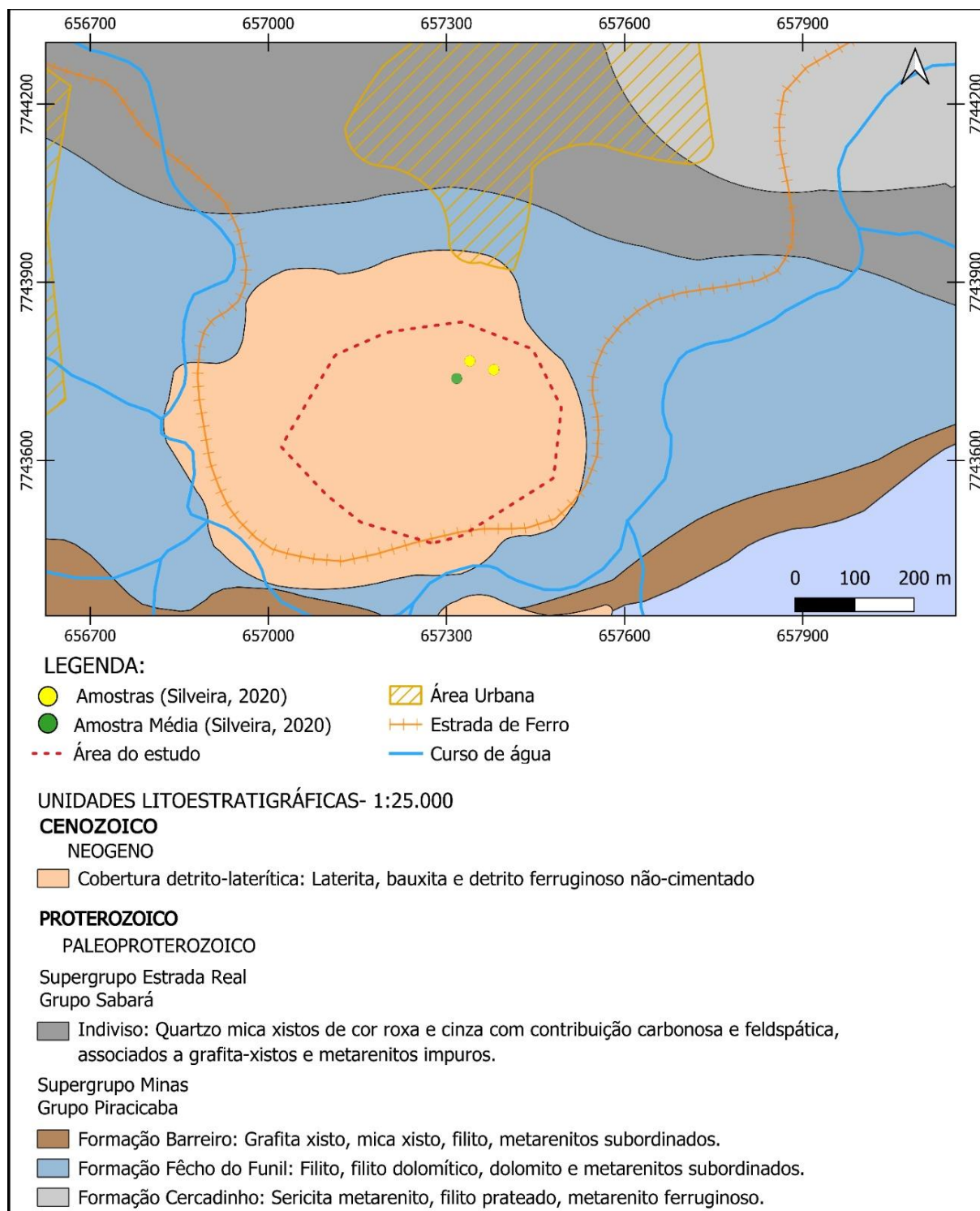
De acordo com Oliveira (2010) e Silveira (2020), as principais litologias presentes no bairro Santa Cruz do município de Ouro Preto, onde está localizada a área de estudo, são filitos pertencentes às Formações Cercadinho, Barreiro e, principalmente, Fecho do Funil e xistos pertencentes ao Grupo Sabará. As coordenadas da “Amostra Média” analisada por Silveira (2020), cujos parâmetros foram utilizados neste trabalho, são condizentes com as unidades Fecho do Funil e Coberturas detrítico-lateríticas da carta geológica da Folha Mariana (Figura 5), além de ter proximidade com áreas mapeadas como Formação Barreiro, Formação Cercadinho e o Grupo Sabará (Basto, 2023). Dessa forma, esse capítulo busca trazer informações pertinentes a geologia da área, com foco nas litologias presentes na Mina de Pirita.

3.1. Quadrilátero Ferrífero

O Cráton São Francisco se situa entre os sistemas orogênicos Borborema, Mantiqueira e Tocantins, relacionados ao Ciclo Brasileiro. Ele constitui uma das principais unidades crustais estáveis do Brasil e ocupa geograficamente a região centro-leste do país. Em sua porção meridional, está inserido o Quadrilátero Ferrífero (QFe), que constitui uma das mais importantes províncias metalogenéticas do país. O QFe ocupa uma área de aproximadamente 7.000 km² na porção central do Estado de Minas Gerais, sendo composto por unidades arqueanas e paleoproterozóicas (Almeida, 1977; Marshak & Alkmim, 1989).

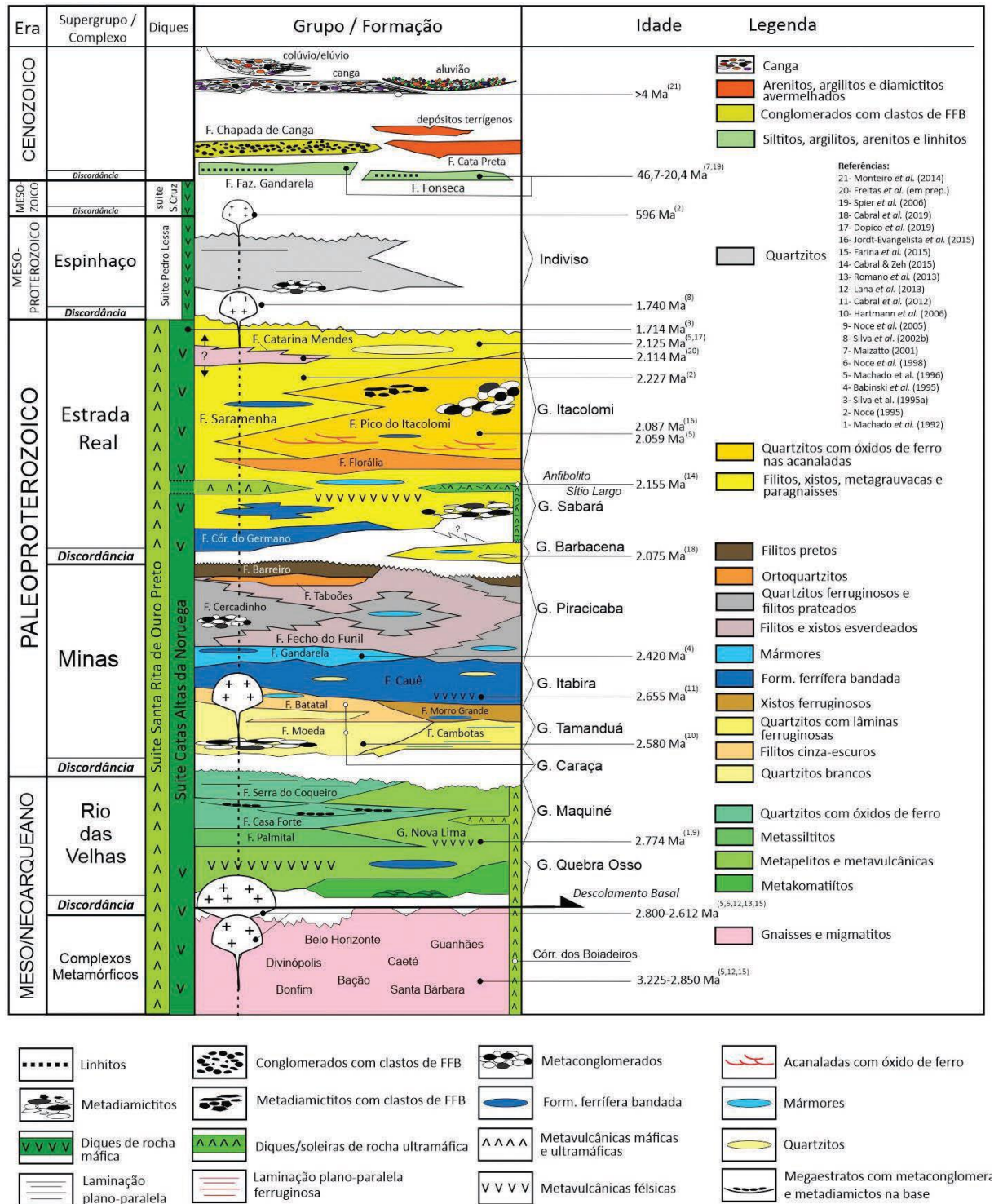
Atualmente, defende-se o QFe seja composto por três grandes unidades litoestratigráficas distintas (Figura 6) (Dorr, 1969; Farina *et al.*, 2016; Endo *et al.*, 2020), sendo elas: 1) complexos metamórficos arqueanos (Herz, 1970; Carneiro, 1992; Noce, 1995); 2) uma sequência vulcanossedimentar arqueana do tipo *greenstone belt*, representada pelo Supergrupo Rio das Velhas (Dorr, 1969); e 3) rochas supracrustais de idade Paleoproterozóica, com sequências metassedimentares e rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas constituindo os Supergrupos Minas e Estrada Real, além de conglomerados e arenitos metamorfizados constituindo o Supergrupo Espinhaço, e materiais como canga, alúvios e elúvios/colúvios com ampla distribuição geográfica compondo as coberturas Cenozóicas no topo de sua estratigrafia (Dorr, 1969; Babinski *et al.*, 1995; Machado *et al.*, 1996; Endo *et al.*, 2020).

Figura 5 – Mapa geológico da região, destacando as unidades litoestratigráficas, a delimitação da área de estudo e a localização das amostras de Silveira (2020).



Fonte: Adaptado de Basto (2023).

Figura 6 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Endo *et al.* (2020).

3.1.1. Complexos Metamórficos

Com idade arqueana entre 2,9 e 3,2 Ga, os complexos metamórficos presentes no QFe são compostos por gnaisses, migmatitos e granitóides, sendo eles: Belo Horizonte, Caeté, Bonfim, Bação e Santa Bárbara (Dorr, 1969; Teixeira, 1985; Machado & Noce, 1993; Alkmim & Marshak, 1998; Farina *et al.*, 2016).

3.1.2. Supergrupo Rio das Velhas

Inicialmente denominado de “Série Rio das Velhas” por Dorr *et al.* (1957), corresponde a um terreno do tipo *greenstone belt* que apresenta sequências de rochas metavulcânicas e metassedimentares de idade também arqueana, entre 2,8 e 2,67 Ga (Dorr, 1969; Almeida, 1976). Ele é constituído, da base para o topo, pelo Grupo Quebra Osso (Schorscher, 1978), composto por metakomatiitos, metabasaltos toleíticos e metariolitos, Grupo Nova Lima (Dorr, 1969; Ladeira, 1980), com sequências metavulcano-sedimentares, e Grupo Maquiné (Dorr *et al.*, 1957; Gair, 1962), representado por filitos, filitos quartzosos e quartzitos sericíticos da Formação Palmital e por filitos, metaconglomerados e quartzitos sericíticos e cloríticos da Formação Casa Forte.

3.1.3. Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é composto por metassedimentos do Paleoproterozoico, de idade entre 2,6 e 2,1 Ga. Atualmente, sua sequência da base para o topo é dada pelos grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba (Dorr *et al.*, 1957; Dorr, 1969; Alkmim & Marshak, 1998; Hartman *et al.*, 2000; Alkmim & Noce 2006; Endo *et al.*, 2020).

O Grupo Tamanduá representa a porção basal do Supergrupo Minas. É composto por quartzitos, ortoquartzitos, quartzitos com lâminas ferruginosas e xistos quartzosos e argilosos da Formação Cambotas, e por xisto filíticos, xistos ferruginosos e formações ferríferas dolomíticas da Formação Morro Grande (Endo *et al.*, 2020). O Grupo Caraça, sobreposto, é constituído por metassedimentos clásticos e se subdivide entre a Formação Moeda (Wallace, 1958), na base, e Batatal (Maxwell & Simmons, 1958) no topo. O Grupo Itabira, por sua vez, é constituído por rochas metassedimentares químicas das Formações Cauê e Gandarela (Simmons, 1968), que fazem contato transicional com as rochas da Formação Batatal, subjacente. Por fim, o Grupo Piracicaba constitui a unidade de topo do Supergrupo Minas, com rochas sedimentares clásticas, e é composto, da base para o topo, pelas formações Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro (Dorr *et al.*, 1957).

A amostra utilizada neste trabalho é proveniente de uma área com predominância de litotipos pertencentes à Formação Fecho do Funil, que faz parte do Grupo Piracicaba. Dessa forma, as formações deste grupo são descritas a seguir.

3.1.3.1. Formação Cercadinho

A Formação Cercadinho possui espessura que varia entre 400 e 900 metros. É constituída essencialmente por bancos decimétricos de quartzito, filito, filito dolomítico, lentes de dolomito, xisto sericítico, metarenito e metaconglomerado (Pomerene, 1958;

Barbosa, 1968; Simmons 1968; Dorr, 1969). Segundo Oliveira (2010), os filitos dessa formação estão presentes na região do bairro Santa Cruz, que contém a área alvo do atual estudo.

3.1.3.2. Formação Fecho do Funil

Definida por Simmons (1958), a Formação Fecho do Funil se dispõe sobrejacente à Formação Cercadinho através de contato transicional e é composta por filito, filito dolomítico, siltito, itabirito dolomítico, dolomito impuro e lentes de metadolomito e metarenito (Barbosa, 1968; Simmons, 1968; Dorr, 1969; Endo *et al.*, 2020). Os filitos dessa formação também estão presentes na área da Mina de Pirita.

3.1.3.3. Formação Taboões

Constituída apenas por quartzitos de granulação muito fina e textura maciça e equigranular, a Formação Taboões usualmente aflora próximo ao município de Nova Lima (Pomerene, 1958; Simmons, 1968). Seus afloramentos apresentam alto grau de cisalhamento, o que colabora para geração de material muito friável. Seu contato com a Formação Barreiro, sobreposta, é concordante e, usualmente, de transição brusca (Dorr *et al.*, 1957; Barbosa, 1968; Dorr, 1969).

3.1.3.4. Formação Barreiro

Definida por Pomerene (1958), a Formação Barreiro é composta por filito, filito grafitoso, xisto grafitoso, xisto rosado e metarenitos subordinados (Simmons, 1968). Sua distribuição é restrita e seus afloramentos são concentrados nos arredores do município de Ouro Preto (Barbosa, 1968). Oliveira (2010) aponta a presença de filitos dessa formação nos arredores do bairro Santa Cruz, descrevendo-os como muito alterados e localmente grafitosos.

3.1.4. *Supergrupo Estrada Real*

Proposto por Endo *et al.*, (2020), o Supergrupo Estrada Real é composto por sequências metassedimentares supracrustais paleoproterozóicas. É subdividido nos Grupos Barbacena, Sabará, que também está presente na área do atual estudo, e Itacolomi, sendo compostos majoritariamente por conglomerados, meta-arenitos e filitos (Endo *et al.*, 2020).

3.1.4.1. Grupo Barbacena

Considerado por Cabral *et al.* (2020) como uma unidade correlata ao Grupo Sabará, o Grupo Barbacena é formado como discordância, apresentando em sua composição grafita xistos, mica xistos, gonditos, metacherts, quartzitos, filitos com intercalações de anfibolito e metaultramáficas.

3.1.4.2. Grupo Sabará

O Grupo Sabará, inicialmente registrado como “Formação Sabará” (Gair, 1958) e posteriormente elevado a condição de Grupo por Renger *et al.*, (1994), possui sua base composta por quartzitos ferruginosos e formações ferríferas bandadas da Formação Córrego do Germano, seguido por clorita xistos, mica xistos, quartzitos e formações ferríferas bandadas da Formação Saramenha, enquanto as porções de topo são compostas por biotita-quartzo xistos, quartzitos e filitos da Formação Catarina Mendes (Dorr, 1969; Noce, 1995). Segundo Oliveira (2010) e Silveira (2020), os xistos do Grupo Sabará compõem mais de 60% do bairro Santa Cruz, também estando presente nos limites da Mina de Pirita.

3.1.4.3. Grupo Itacolomi

Sobrepondo as rochas do Grupo Sabará estão os ortoquartzitos, quartzitos e metaconglomerados do Grupo Itacolomi. Esse grupo é subdividido nas formações Florália e Pico do Itacolomi. A primeira, e basal, é constituída por ortoquartzitos, enquanto que a seguinte é constituída por quartzitos e metaconglomerados (Endo *et al.*, 2020).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo, que contempla a Mina de Pirita, está localizada no município de Ouro Preto, mais especificamente no bairro Santa Cruz (Figura 1). O atual trabalho foi desenvolvido a partir de dados bibliográficos e bases digitais de representação topográfica da área de estudo.

Como principal referência teórica, foi utilizada a dissertação de mestrado de Silveira (2020), que trata da caracterização geotécnica da Mina de Pirita para fins de estabilização dos taludes e recuperação das voçorocas presentes na região. O trabalho foi utilizado como base para definição dos materiais presentes na região e para a obtenção de parâmetros geotécnicos que serviriam de entrada nas análises realizadas posteriormente, em especial os parâmetros da “Amostra Média”, que foram extrapolados como parâmetros definitivos do solo de alteração de filito/xisto da área da mina.

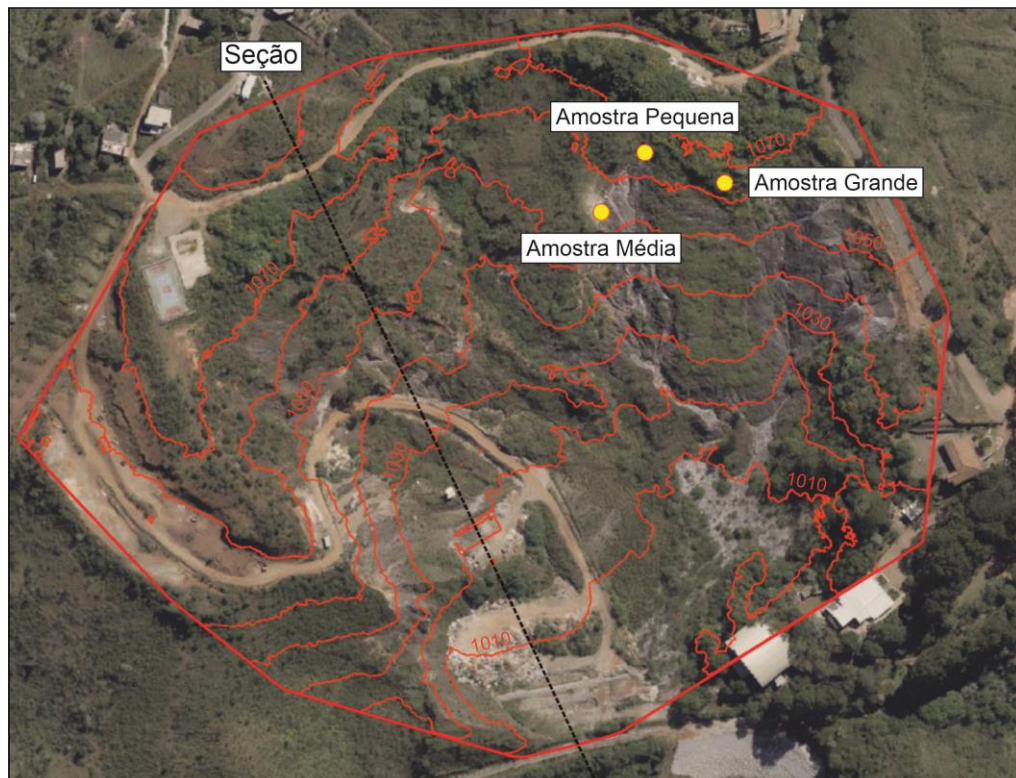
Além disso, foi disponibilizado pelo orientador do presente trabalho um modelo digital tridimensional da área da mina, representativo de sua topografia. O modelo foi obtido a partir de levantamento aerofotogramétrico realizado com veículo aéreo não tripulado (VANT), sendo posteriormente processado no software Pixpro, o que possibilitou a geração de uma representação detalhada da superfície do terreno.

A partir desses materiais, foram realizadas etapas de definição da seção a ser avaliada e as análises de estabilidade no software Slide2 (Rocscience). Para a realização dessas análises, entretanto, foi necessária a definição prévia das condições do projeto, dos parâmetros dos materiais, dos métodos de análise e do intervalo de variação do fator R_u a ser adotado.

4.1. Seleção dos objetos de estudo

Um dos grandes problemas ambientais presentes na área da Mina de Pirita é a formação de voçorocas. Além disso, os trabalhos de retaludamento na região já tiveram início, com a construção de duas a três bancadas na parte inferior da encosta. Portanto, a partir dos limites da área de estudo, definidos com base no modelo topográfico inicial, buscou-se a definição de um perfil representativo, cuja seção contivesse a superfície do terreno das voçorocas e também das bancadas já construídas (Figura 7).

Figura 7 – Mapa topográfico da área de estudo com curvas de nível de equidistância vertical de 10 m, localização da seção analisada e das amostras de Silveira (2020).



Fonte: Autor.

4.1.1. *Uso do software Deswik.CAD para elaboração da seção*

A partir da definição conceitual do local por onde o perfil deveria passar, foi elaborada uma seção representativa da geometria da área de estudo com a utilização do software Deswik.CAD (Deswik) e do modelo digital tridimensional disponibilizado inicialmente. Essa seção foi posteriormente utilizada como entrada geométrica para as simulações de estabilidade conduzidas no software Slide2.

4.2. Análises de estabilidade no software Slide2

A seção definida na etapa anterior foi utilizada como geometria inicial no software Slide2, onde foram conduzidas as análises seguintes. Os parâmetros gerais do projeto foram definidos neste momento, para garantir uniformidade e maior confiabilidade das análises.

4.2.1. *Considerações iniciais e definição dos métodos de análise*

A definição das configurações gerais quando se inicia um novo projeto no software Slide2 é uma etapa de extrema importância, visto que o que for estabelecido naquele momento, idealmente, será mantido até o final da etapa de análises.

Nesse sentido, o atual trabalho optou pela utilização de três métodos de análise específicos baseados na técnica das fatias (Fellenius, 1936), visando identificar possíveis

diferenças relevantes nos resultados. As análises foram, então, realizadas utilizando-se dos métodos GLE/Morgenstern-Price, Spencer e Janbu corrected. Neste momento, também foi definido que o critério de resistência dos materiais a serem utilizados ao longo do trabalho seria o de Mohr-Coulomb e que seriam analisados cenários considerando os tipos de superfície potencial de ruptura circular, através do método de busca com refinamento automático (*Auto Refine Search*), e não-circular, através do método de busca por enxame de partículas (*Particle Swarm Search* - PSO).

4.2.2. Definição de parâmetros dos materiais

Para que seja possível realizar as análises de estabilidade no software Slide2, faz-se necessário a definição das propriedades dos materiais envolvidos no determinado cenário. Dito isso, os parâmetros de entrada necessários para as análises desse trabalho incluíram peso específico (γ), coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), tanto do solo de alteração de filito/xisto, como do RCD.

O perfil representativo da área de estudo, entretanto, não contava com amostras das quais seria possível a obtenção dos parâmetros via ensaios laboratoriais. Dessa forma, a solução encontrada foi utilizar os dados do trabalho de Silveira (2020). No trabalho, a autora faz a coleta e realiza ensaios laboratoriais em três amostras indeformadas de solo da região da Mina de Pirita. A denominada “Amostra Média”, coletada nas coordenadas UTM 657340 m E e 7744520 m N, zona 23S, datum SIRGAS 2000, corresponde à amostra localizada mais próxima, em termos geográficos, do perfil aqui definido e, portanto, os resultados de seus ensaios foram adotados como representativos do material presente na encosta estudada (Figura 7).

Ressalta-se que a adoção de parâmetros provenientes da literatura implica na introdução de incertezas adicionais ao modelo, razão pela qual os fatores de segurança obtidos devem ser interpretados como representativos da tendência de comportamento dos cenários analisados.

Entre os resultados obtidos por Silveira (2020), utilizou-se diretamente no atual trabalho os valores de coesão (c) = 25 kPa e ângulo de atrito (ϕ) = 35,44°, além dos valores de teor de umidade (w) = 4,826% e peso específico das partículas sólidas (γ_s) = 26,657 kN/m³. A análise granulométrica da autora indicou que a “Amostra Média” apresenta características de solo arenoso com silte ou, mais especificamente, areia fina siltosa, com frações de areia fina (57%) e média (17%) somando 74% da amostra, enquanto a fração silte compõe 20%.

Os valores de teor de umidade (w) e peso específico das partículas sólidas (γ_s) foram utilizados para o cálculo do peso específico (γ), de acordo com a Equação 4.

Direcionado pelo resultado da análise granulométrica obtida por Silveira (2020), o valor do índice de vazios (e) foi estabelecido com base na literatura, de acordo com referências que avaliaram areia graduada, areia siltosa, solos de alteração de filito ou solos residuais (Tabela 2). O valor médio assumido para o trabalho foi $e = 0,55$, o que resultou em um peso específico (γ) = 18,03 kN/m³.

Para os parâmetros do RCD, novamente foi necessário recorrer aos dados da literatura (Tabela 1). Entretanto, a heterogeneidade do material faz com que os dados presentes na bibliografia variem excessivamente. Além disso, grande parte dos trabalhos encontrados trata de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R), cujo material passa por operações como britagem e/ou separação de componentes como metais, madeira e vidro, não correspondendo a realidade do material que vem sendo utilizado no retaludamento da área de estudo.

Diante da grande variabilidade dos dados de referência, optou-se pela utilização de parâmetros conservadores, além de assumir dois diferentes valores para o ângulo de atrito do RCD. Assim, para as análises de estabilidade foram utilizados os valores fixos de coesão (c) = 2,5 kPa e peso específico (γ) = 20 kN/m³. Assumiu-se, também, que a alta heterogeneidade do RCD garantiria propriedade drenante para o material e, dessa forma, optou-se por utilizar o valor fixo de zero para o parâmetro R_u . Para o ângulo de atrito (ϕ) foram determinados os valores de 30° e 35°. Considerando a adoção desses dois valores de ângulo de atrito para o material RCD, e visando facilitar a leitura e interpretação do trabalho, as variações serão, quando necessário, identificadas como RCD₃₀ e RCD₃₅, em função dos respectivos ângulos de atrito utilizados.

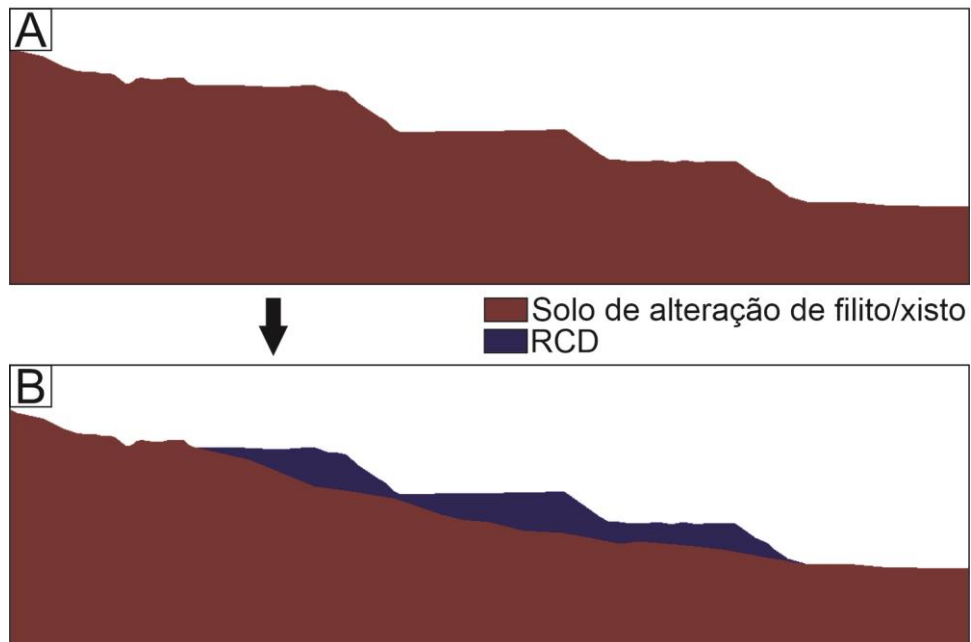
4.2.3. Definição do parâmetro R_u

Uma vez definidos e fixados os valores de peso específico, coesão e ângulo de atrito do solo de alteração de filito/xisto e das duas variações de RCD, optou-se por variar o parâmetro R_u do solo de alteração de filito/xisto com o objetivo de analisar diferentes cenários de condição hidráulica. O intervalo de variação adotado incluiu os valores de R_u iguais a 0, 0,3, 0,5, 0,7 e 0,9. Adicionalmente, foi considerado o peso específico do fluido presente nos poros do material igual a 9,81 kN/m³, assumindo-se que o fluido corresponde à água.

4.2.4. Definição do limite entre material “*in situ*” e RCD nas bancadas já feitas

Na seção original, correspondente ao relevo atual da área, já foram construídas duas a três bancadas. Apesar da ausência de etapa de campo, assumiu-se que essas bancadas já teriam sido construídas com a utilização do RCD. Não há dados de subsuperfície, o que torna impossível a determinação exata do contato entre os materiais. Por conta disso, foi necessário estimar um contato entre o solo alterado de filito/xisto na base da encosta e o RCD depositado sobre ele durante a construção das bancadas. O contato foi traçado de forma interpretativa, buscando-se manter um ângulo de inclinação próximo ao ângulo geral da encosta (Figura 8).

Figura 8 – Detalhe da base da encosta na seção representativa da topografia atual da área. A) Seção original; B) Contato interpretado entre o material *in situ* e o RCD já depositado.



Fonte: Autor.

4.2.5. Análises de estabilidade dos diferentes cenários

Para cada um dos cenários foram feitas análises de estabilidade variando o R_u do solo de alteração de filito/xisto e assumindo dois valores distintos para o ângulo de atrito do RCD, uma vez ressaltada a alta variabilidade deste material.

O primeiro cenário reflete a situação atual da encosta, com a maior parte de sua extensão sendo o terreno natural da mesma, exceto por sua base, que já se encontra com algumas bancadas construídas (Figura 8) pela empresa que, atualmente, desenvolve trabalhos de retaludamento da região. O segundo cenário assumiu uma projeção da geometria que vem sendo utilizada por essa mesma empresa, utilizando valores médios de inclinação e altura de bancada, e calculando o maior comprimento possível de berma para que o retaludamento alcançasse toda a extensão da encosta. Da mesma forma, o terceiro cenário buscou a

adequação da geometria projetada no cenário anterior, a fim de alcançar um fator de segurança adequado para uma situação de fechamento de mina e, ao mesmo tempo, tentando otimizar o volume de RCD que seria destinado às obras. Por fim, o quarto e último cenário corresponde à geometria final proposta para a encosta, com RCD recoberto com uma camada de 50 centímetros de solo.

5. RESULTADOS

Os resultados alcançados através dos métodos de análise GLE/Morgenstern-Price, Janbu Corrected e Spencer foram, em sua totalidade, muito semelhantes. Além disso, o mesmo ocorreu em relação ao formato da superfície de ruptura, sendo que as análises considerando superfícies de ruptura não circulares resultaram em fatores de segurança ligeiramente menores quando comparadas às análises com superfícies circulares.

Por conta disso, visando uma apresentação mais clara e enxuta dos dados, neste capítulo serão apresentados os resultados referentes às análises feitas através do método GLE/Morgenstern-Price e considerando um mecanismo de ruptura não circular. Os resultados podem ser consultados na íntegra através do Apêndice A.

Cabe ressaltar que os parâmetros geotécnicos adotados nas análises foram obtidos a partir de dados da literatura e de correlações, em função da ausência de ensaios específicos para a área estudada. Dessa forma, os fatores de segurança apresentados devem ser interpretados como estimativas indicativas da tendência de comportamento dos cenários avaliados, visto que os valores absolutos obtidos estão diretamente condicionados às incertezas dos parâmetros adotados.

Também é importante reforçar que todas as análises consideraram, para o solo presente na região, peso específico de $18,03 \text{ kN/m}^3$, coesão de 25 kPa e ângulo de atrito de $35,44^\circ$, variando apenas o parâmetro R_u . Assim como peso específico de 20 kN/m^3 , coesão de $2,5 \text{ kPa}$ e parâmetro R_u de 0, com ângulos de atrito de 30° e 35° para o RCD_{30} e RCD_{35} , respectivamente.

5.1. Cenário 1: Análise da geometria original

A geometria original da encosta apresenta uma altura total de $84,25$ metros e distância horizontal total, entre o pé da primeira bancada e o topo da encosta, de aproximadamente 336 metros. Essas medidas seguem constantes para análises de outros cenários. O comprimento das bermas das bancadas já construídas varia de $18,15$ a $23,1$ metros, a altura das mesmas varia de $4,55$ a $6,35$ e o ângulo de inclinação geral da encosta é 14° .

Para esse cenário, todas as análises realizadas utilizando o fator $R_u \geq 0,7$, independente do RCD utilizado, resultaram em um FS menor que um. Os resultados considerando RCD_{30} para R_u igual a $0,0$ até $0,5$ foram $\text{FS} = 1,17$. Já os resultados com RCD_{35} e $R_u \leq 0,5$ mostram um FS entre $1,36$ e $1,47$. A Tabela 5 exibe os resultados das análises de estabilidade para o primeiro cenário.

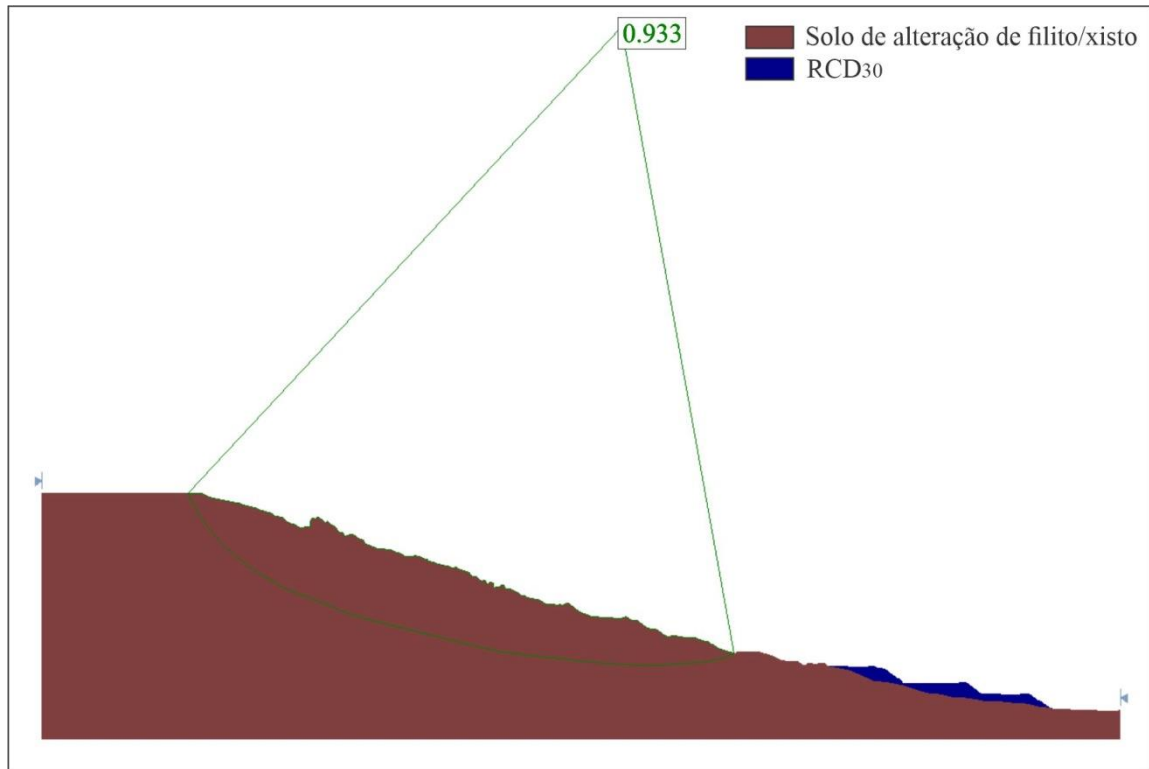
É importante ressaltar que as análises com fator de segurança inferior a um resultaram em rupturas de maior escala e, na maioria dos casos, restritas ao material *in situ*, enquanto que, nas análises que chegaram a um FS maior que um, as superfícies de ruptura estariam alocadas, na maioria dos casos, no RCD e em escala de bancada. As Figuras 9 a 12 exemplificam tais resultados.

Tabela 5 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 1.

Filito/Xisto Alterado	RCD	FS
R_u	φ (°)	(GLE)
0,0	30	1,17
0,3	30	1,17
0,5	30	1,17
0,7	30	0,93
0,9	30	0,42
0,0	35	1,36
0,3	35	1,36
0,5	35	1,47
0,7	35	0,93
0,9	35	0,42

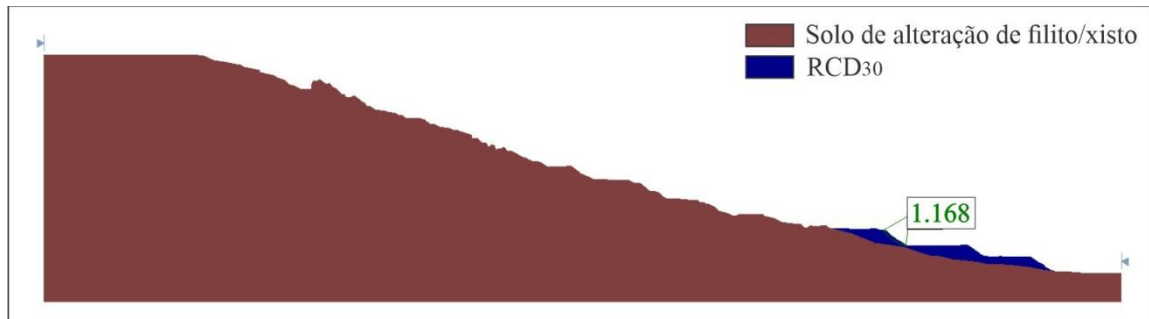
Fonte: Autor.

Figura 9 - Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{30} , $R_u = 0,7$.



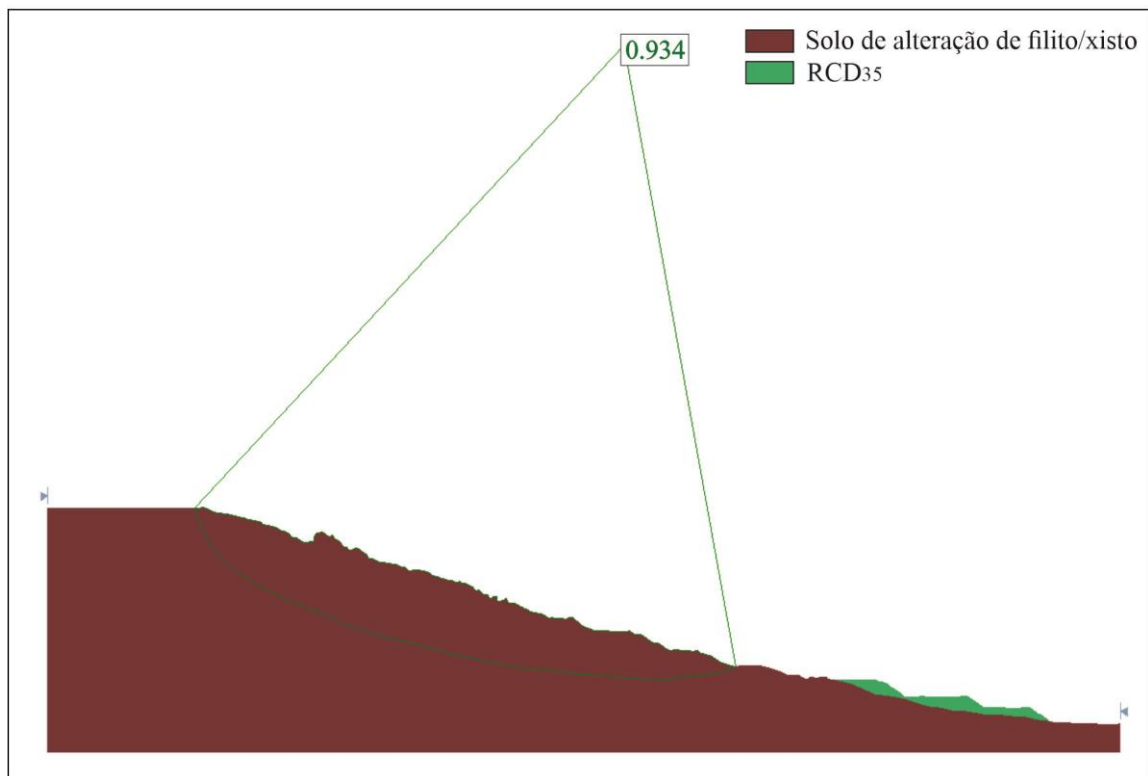
Fonte: Autor.

Figura 10 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD_{30} , $R_u = 0,3$.



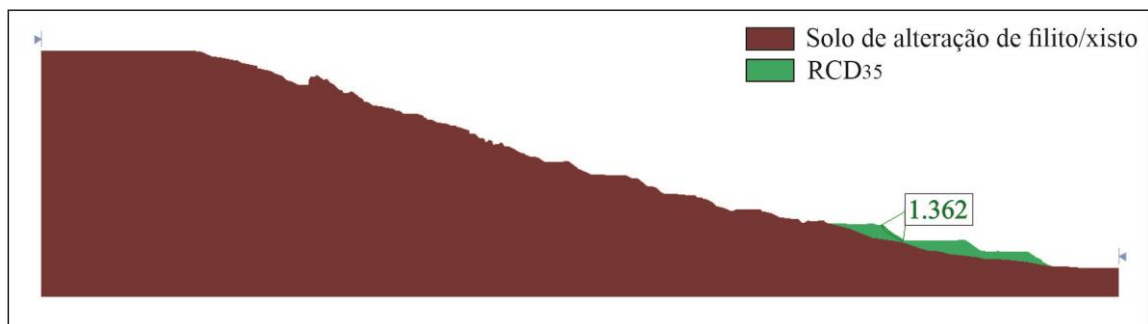
Fonte: Autor.

Figura 11 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD₃₅, $R_u = 0,7$.



Fonte: Autor.

Figura 12 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 1, RCD₃₅, $R_u = 0,3$.



Fonte: Autor.

5.2. Cenário 2: Análise da projeção de geometria das bancadas existentes

Para esse grupo de análises, considerou-se bancadas com altura média de 5,35 metros e inclinação de 34°. O comprimento das bermas foi de 10,5 metros.

Neste cenário, novamente, todas as análises realizadas assumindo valores do fator $R_u \geq 0,9$ resultaram em um FS menor que um. Os resultados para $R_u \leq 0,5$, com RCD₃₀ foram FS = 1,26 e com RCD₃₅ foram FS = 1,47. Tais resultados para o segundo cenário podem ser observados na Tabela 6.

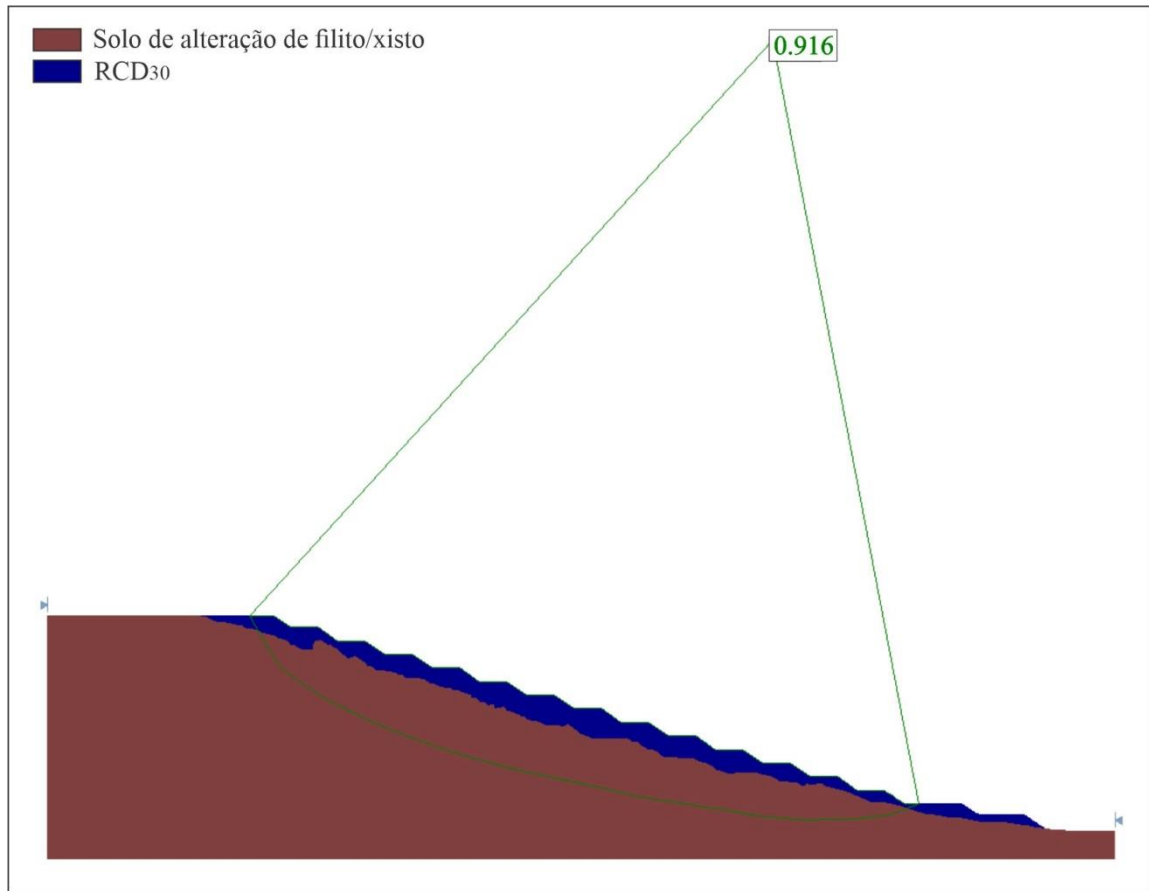
Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 2.

Filito/Xisto Alterado	RCD	FS
R_u	φ (°)	(GLE)
0,0	30	1,26
0,3	30	1,26
0,5	30	1,26
0,7	30	0,92
0,9	30	0,38
0,0	35	1,47
0,3	35	1,47
0,5	35	1,47
0,7	35	0,92
0,9	35	0,38

Fonte: Autor.

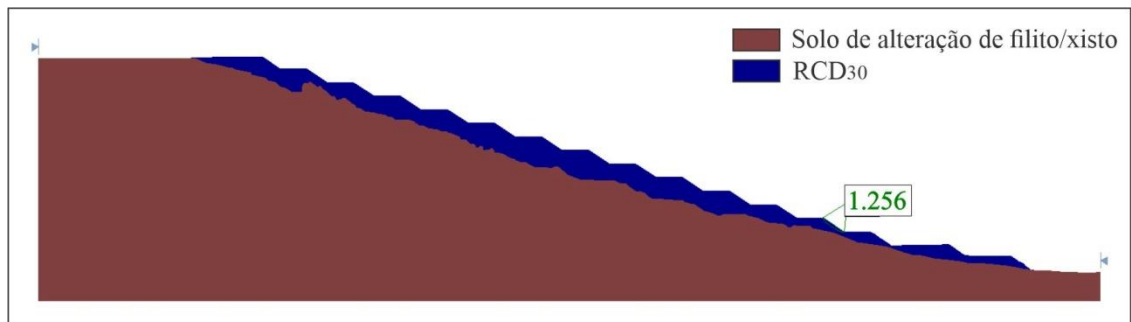
Nas análises com fator de segurança inferior a um, ocorreram rupturas globais, envolvendo a quase totalidade do talude (Figuras 13 e 15). Já nas análises com FS = 1,26 e FS = 1,47, observa-se que ocorreriam, na maioria dos casos, rupturas locais, restritas a uma única bancada (Figuras 14 e 16).

Figura 13 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{30} , $R_u = 0,7$.



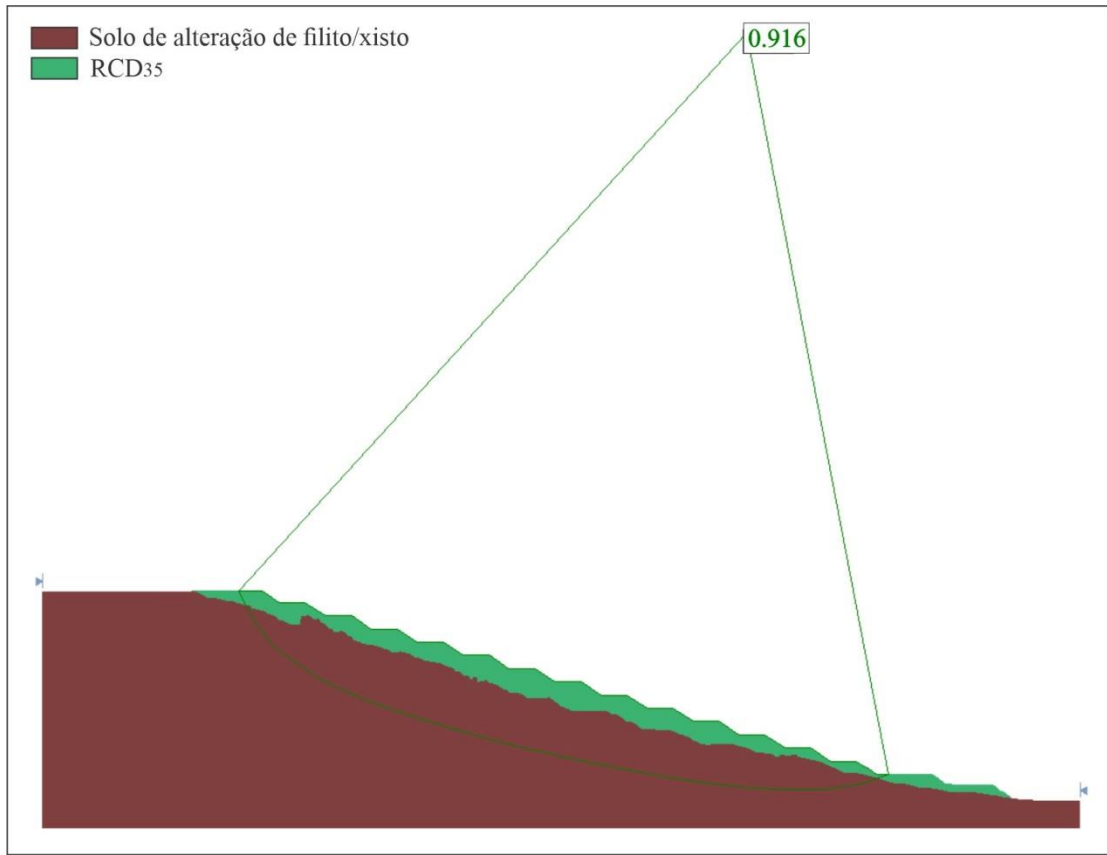
Fonte: Autor.

Figura 14 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{30} , $R_u = 0,3$.



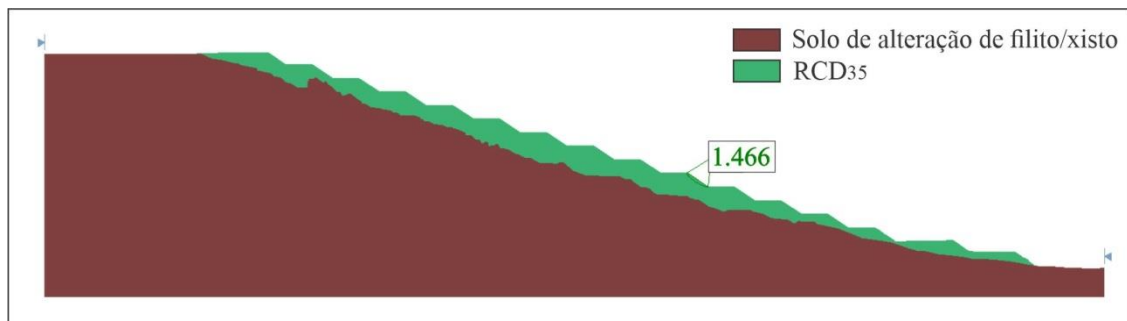
Fonte: Autor.

Figura 15 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{35} , $R_u = 0,7$.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 2, RCD_{35} , $R_u = 0,3$.



Fonte: Autor.

5.3. Cenário 3: Análise da nova geometria proposta

A nova geometria proposta para o talude assume um conjunto de bancadas com altura média de 5 metros e inclinação de 30° . O comprimento das bermas foi de 9,5 metros.

Mesmo com a suavização do ângulo de inclinação e redução na altura das bancadas, não houve um ganho substancial no FS das análises que assumiram $R_u \geq 0,7$, que continuaram abaixo de um. Porém, os resultados para $R_u \leq 0,5$ apresentaram melhorias na estabilidade do talude, com o cenário utilizando o material RCD_{30} chegando a FS de 1,43 e 1,44, e o cenário

utilizando RCD_{35} alcançando FS entre 1,56 e 1,68. Os dados obtidos são exibidos na Tabela 7.

Esse resultado, com o FS atingindo valores acima de 1,5 para $R_u = 0,5$ pela primeira vez, foi considerado satisfatório e a geometria proposta nessa etapa foi selecionada para dar sequência à etapa final de análises.

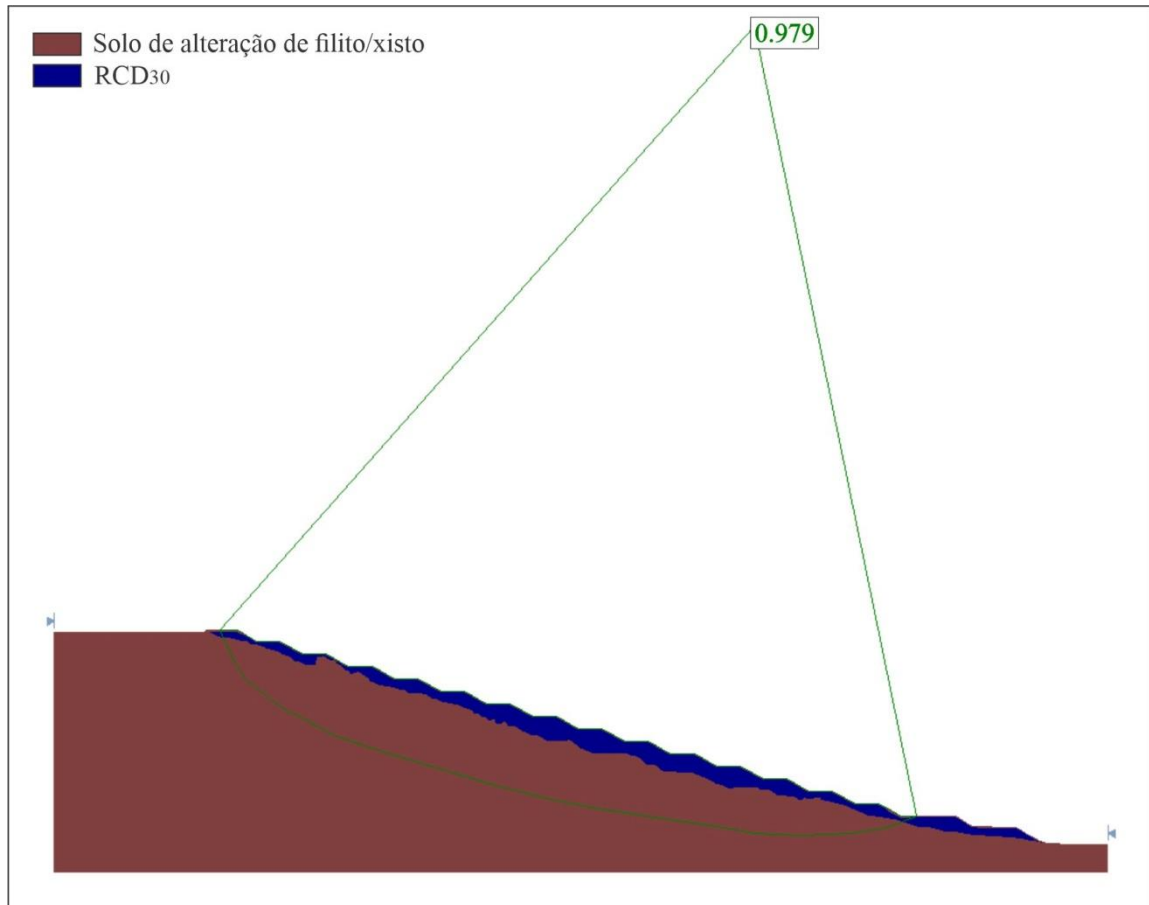
Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 3.

Filto/Xisto Alterado	RCD	FS
R_u	ϕ (°)	(GLE)
0,0	30	1,43
0,3	30	1,43
0,5	30	1,44
0,7	30	0,98
0,9	30	0,41
0,0	35	1,68
0,3	35	1,68
0,5	35	1,56
0,7	35	0,98
0,9	35	0,41

Fonte: Autor.

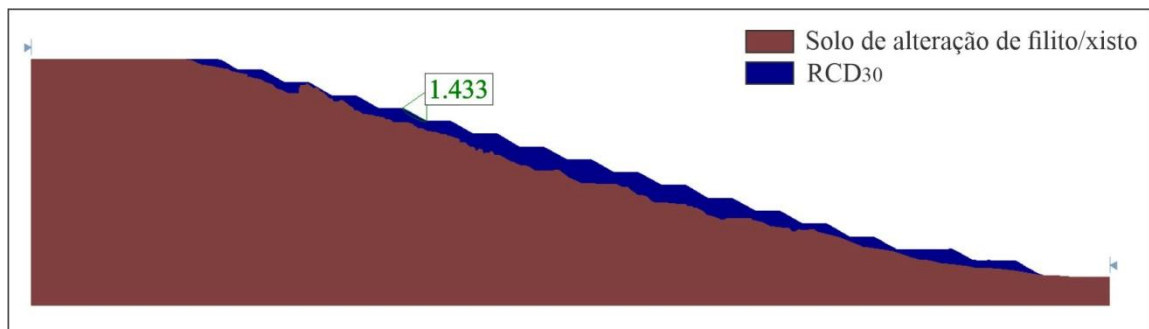
Em relação às superfícies de ruptura, os resultados foram semelhantes aos das etapas anteriores. Para análises com fator de segurança inferior a um, haveria ruptura global do talude (Figuras 17 e 19), enquanto que para análises com fatores de segurança superior a um, o mecanismo de ruptura não comprometeria o talude global, estando limitado a uma única bancada, como mostram as Figuras 18 e 20.

Figura 17 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{30} , $R_u = 0,7$.



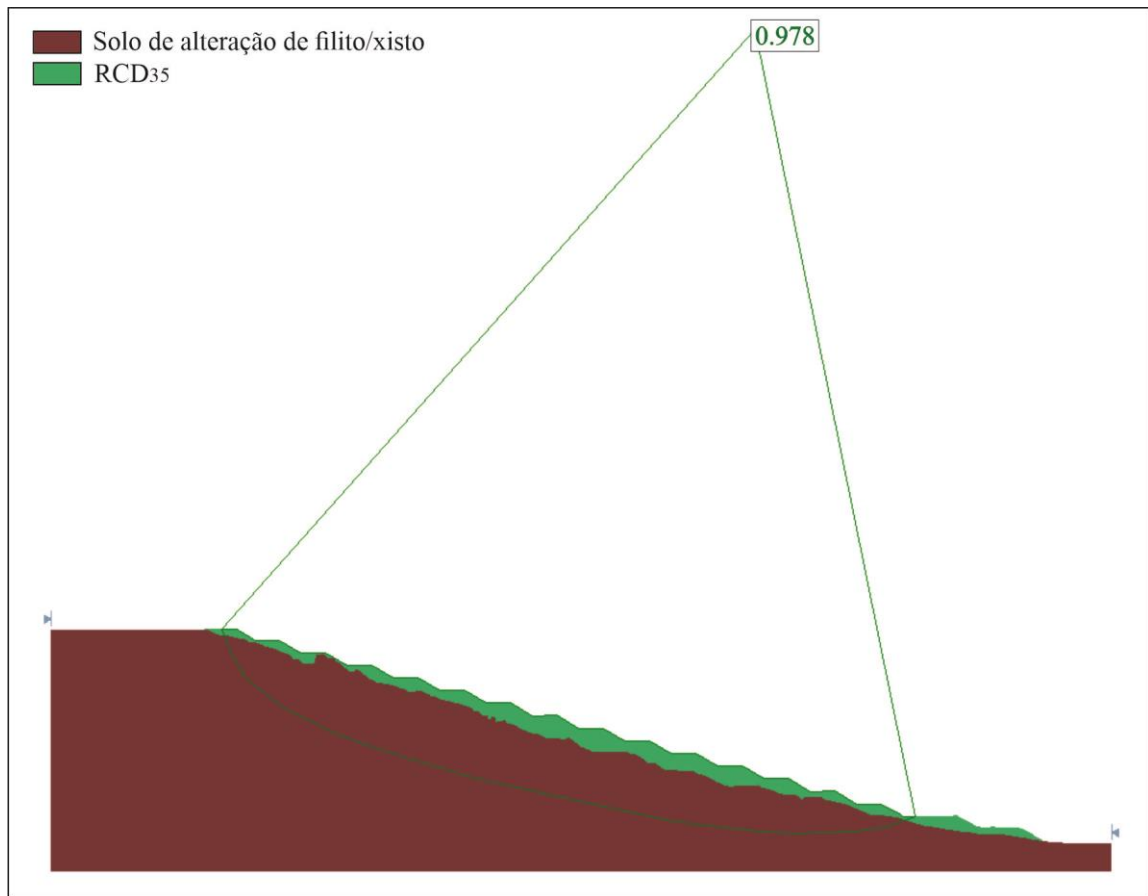
Fonte: Autor.

Figura 18 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{30} , $R_u = 0,3$.



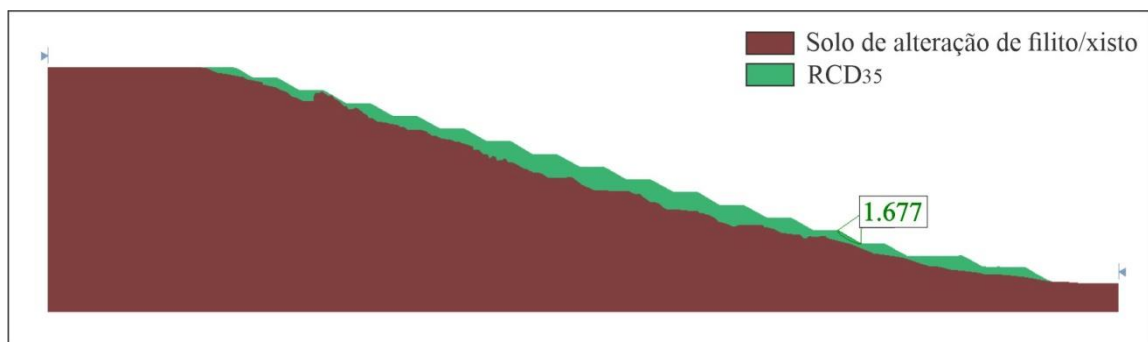
Fonte: Autor.

Figura 19 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{35} , $R_u = 0,7$.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 3, RCD_{35} , $R_u = 0,3$.



Fonte: Autor.

5.4. Cenário 4: Análise da geometria final

Para o último grupo de análises, foi utilizada a mesma geometria da etapa anterior, com bancadas de 5 metros de altura e inclinação de 30° , e bermas com 9,5 metros de comprimento. O diferencial para o cenário 4 foi a adição de uma camada de 0,5 metro de solo acima da camada de RCD. Assumiu-se que o material de cobertura seria o próprio solo disponível na região e, portanto, manteria os mesmos valores para os parâmetros de peso específico, coesão e ângulo de atrito.

A aplicação da camada de cobertura promoveu um ganho de estabilidade ainda maior, especialmente para cenários secos e pouco saturados, gerando aumento de até 0,3 no fator de segurança em relação ao cenário anterior. Para análises com valor de $R_u \geq 0,7$, entretanto, o FS continuou menor que um. Já os resultados usando valores de $R_u \leq 0,5$, quando utilizando material RCD₃₀ mostraram FS entre 1,56 e 1,73, e utilizando material RCD₃₅ chegaram a FS entre 1,57 e 1,99. A Tabela 8 traz os resultados das análises de estabilidade para o quarto e último cenário.

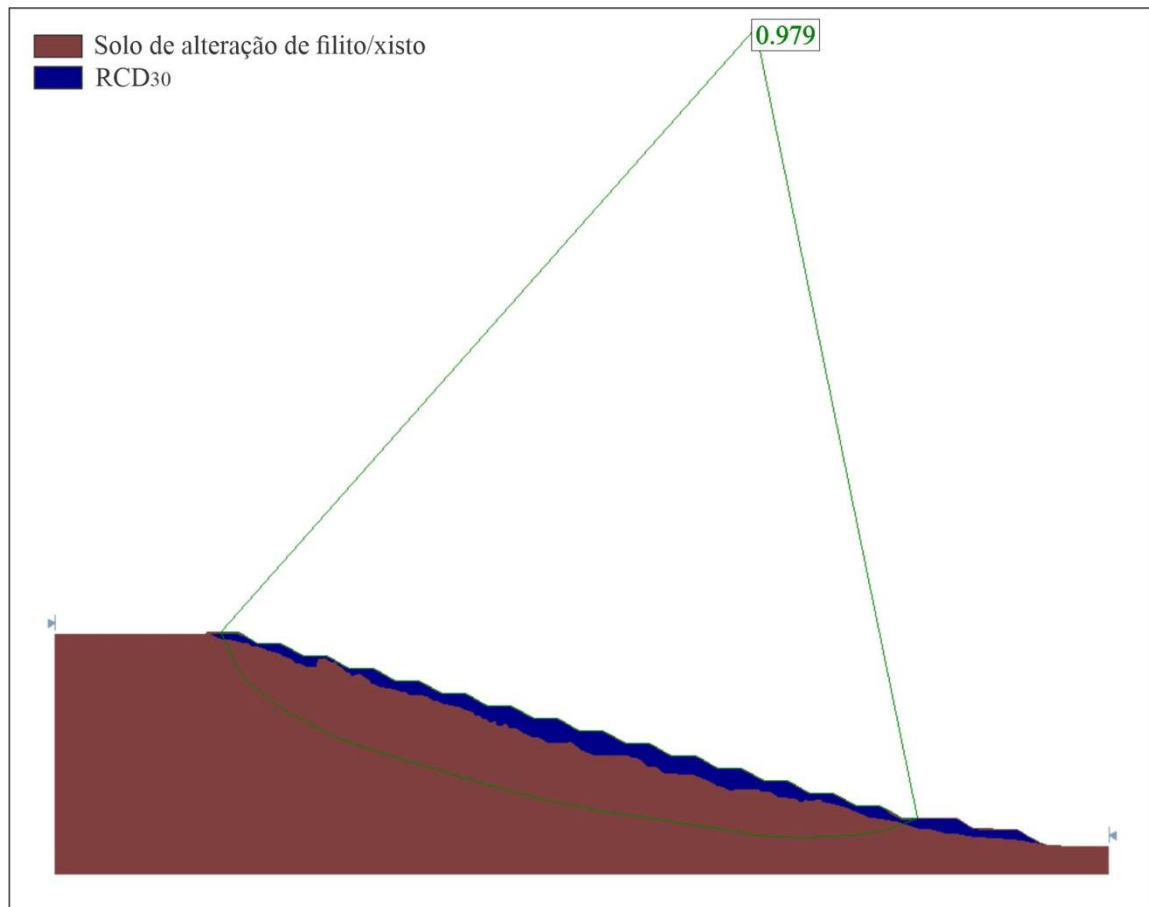
Tabela 8 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade para o Cenário 4.

Filito/Xisto Alterado	RCD	FS
R_u	ϕ (°)	(GLE)
0,0	30	1,73
0,3	30	1,72
0,5	30	1,56
0,7	30	0,98
0,9	30	0,41
0,0	35	1,99
0,3	35	1,98
0,5	35	1,57
0,7	35	0,98
0,9	35	0,41

Fonte: Autor.

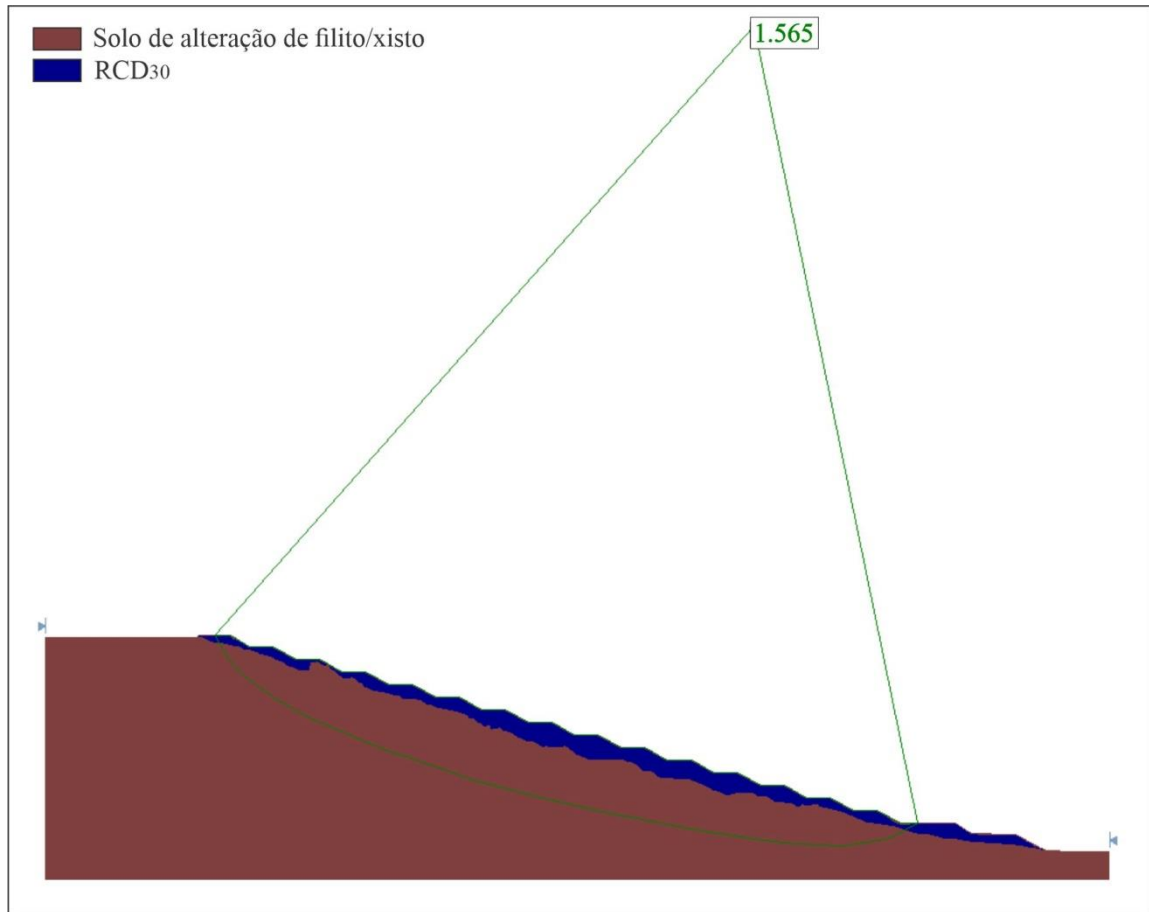
Para a geometria do cenário final, as análises com R_u igual a 0,7 e 0,9 seguem indicando potencial ruptura global envolvendo todas as bancadas (Figuras 21 e 24). Entre os cenários com $FS \geq 1,5$ e que, portanto, atenderam o critério de estabilidade adotado, as análises com $R_u = 0,5$ também indicaram uma superfície de ruptura global (Figuras 22 e 25), enquanto que para R_u igual a 0 ou 0,3, indicam superfícies de rupturas locais, limitadas a uma única bancada (Figuras 23 e 26).

Figura 21 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,7$.



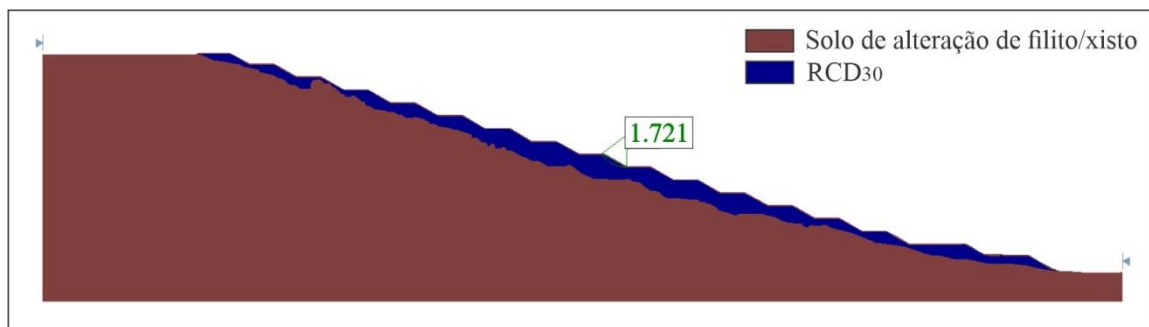
Fonte: Autor.

Figura 22 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,5$.



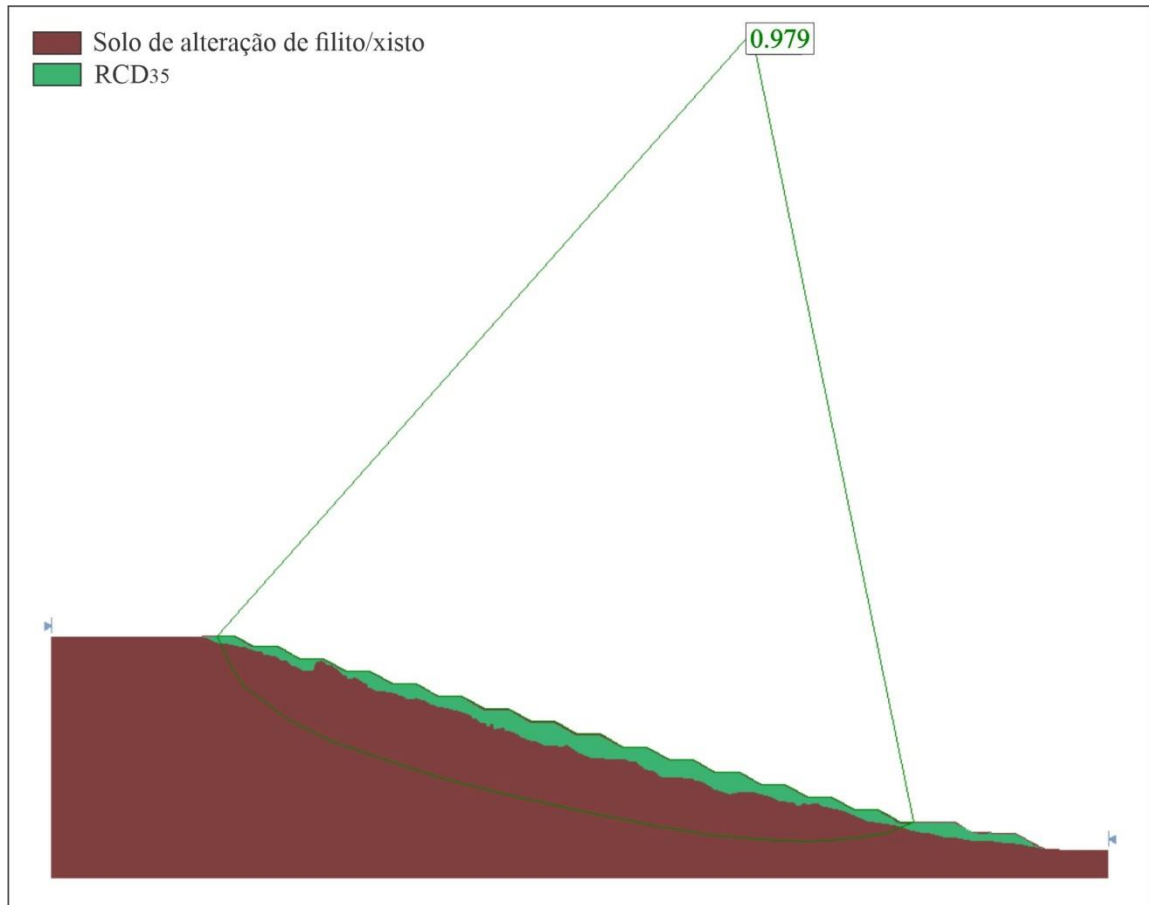
Fonte: Autor.

Figura 23 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{30} , $R_u = 0,3$.



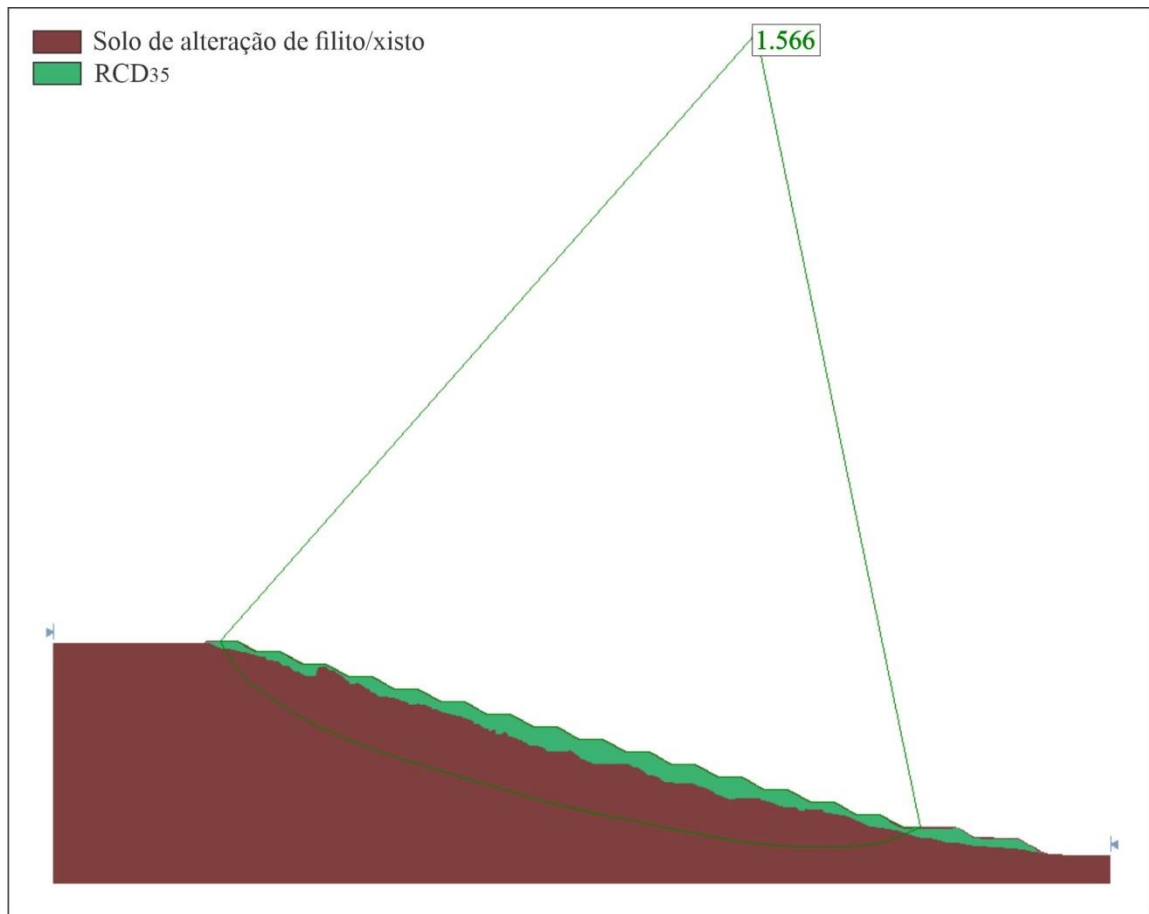
Fonte: Autor.

Figura 24 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,7$.



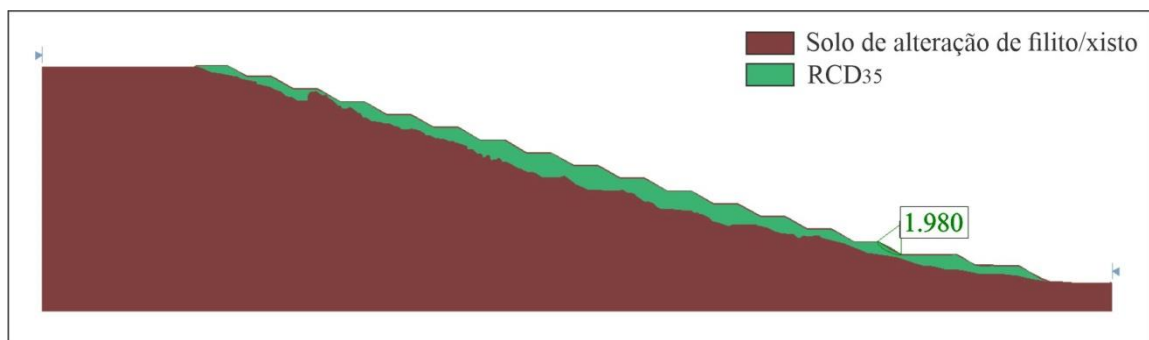
Fonte: Autor.

Figura 25 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,5$.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Superfície crítica de ruptura e FS mínimo – Cenário 4, RCD_{35} , $R_u = 0,3$.



Fonte: Autor.

6. DISCUSSÕES

Neste capítulo são discutidos os resultados obtidos nas análises de estabilidade realizadas para os diferentes cenários avaliados. A interpretação dos resultados busca validar a eficiência das alternativas propostas para o aumento da estabilidade do talude estudado, levando em consideração as limitações impostas ao trabalho. Além disso, o capítulo aborda a identificação dos principais parâmetros que influenciam o comportamento do talude, e quais as implicações práticas dos resultados para a estabilização do talude, incluindo o uso de materiais disponíveis localmente e medidas complementares de engenharia.

6.1. Limitações metodológicas

É importante destacar que uma parte significativa dos dados de entrada utilizados para realização das análises foi definida por meio de correlações e valores típicos reportados na bibliografia, em função da limitação de dados experimentais específicos, uma vez que o presente estudo não contou com ensaios laboratoriais e etapas de campo. Essa condição é especialmente importante na definição de parâmetros geotécnicos do RCD, visto que se trata de um material extremamente heterogêneo e que não conta com métodos consolidados e padronizados para determinação de suas características geotécnicas (Pinto, 1986; Bossink & Brouwers, 1996; Konstantopoulou & Spanou, 2013).

Os dados extraídos diretamente do trabalho de Silveira (2020) também trazem incertezas, visto serem informações de uma amostra que não está localizada exatamente sobre o perfil aqui estudado. Além disso, as três amostras do trabalho citado apresentam alta variabilidade de parâmetros entre elas, o que também contribui para uma maior incerteza do estudo.

Nesse contexto, embora tenham sido priorizados parâmetros conservadores com o intuito de reduzir a possibilidade de superestimação da estabilidade, os fatores de segurança obtidos devem ser interpretados como indicadores de tendência de comportamento, e não como valores absolutos ou parâmetros de projeto.

Dessa forma, os resultados devem ser interpretados sob a perspectiva de um estudo preliminar, estando sujeitos às incertezas associadas à alta variabilidade dos materiais, às suposições realizadas e à utilização de parâmetros provenientes da literatura.

6.2. Avaliação comparativa dos cenários analisados

Apesar da ausência de uma norma única que estabeleça que o fator de segurança em uma situação de fechamento de mina deva ser igual ou maior que 1,5, diversos guias

nacionais e internacionais de boas práticas discorrem sobre a necessidade de garantir a estabilidade física da área (Sánchez *et al.*, 2013; ICM, 2025). No contexto normativo brasileiro, a NBR 11682 estabelece valores mínimos recomendados de Fator de Segurança conforme o nível de risco envolvido, sendo usual a adoção de valores da ordem de 1,5 para condições permanentes e cenários de risco elevado. Embora a norma não trate especificamente de fechamento de mina, seus critérios podem ser utilizados como referência técnica complementar (ABNT, 2009). Isso mostra que é comum a prática de adotar critérios conservadores para garantir segurança a longo prazo, uma vez que o fechamento de mina estabelece condições permanentes para uma área que, muitas vezes, não contará com manutenção constante. Dessa forma, o atual trabalho considerou como 1,5 o fator de segurança mínimo ideal para a área após as obras relacionadas com o retaludamento para fechamento da Mina de Pirita.

Os resultados obtidos nas análises do primeiro cenário, correspondente a situação atual da encosta, revelam que, apesar da região não se encontrar estável para cenários com R_u iguais ou menores que 0,5, o FS ainda se encontra abaixo do ideal e, por isso, é confirmada a necessidade de um retaludamento da encosta. As análises do segundo cenário, utilizando medidas de altura e inclinação de bancadas que vêm sendo aplicadas pela empresa que iniciou os trabalhos na região, mostraram melhoria pouco relevante quando comparada com a situação real atual, aumentando o FS em pouco menos que 0,1. Isso indica que a utilização de uma altura de bancada de 5,35 metros com inclinação de 34°, apesar de possibilitar a deposição de maiores quantidades de RCD, pode não ser o suficiente para garantir a estabilidade da região a longo prazo.

Quando observamos o cenário 3, com a nova geometria de 30° de inclinação para bancadas de 5 metros de altura, é possível certificar aumentos de até 0,32 no FS, fazendo com que, para o material RCD₃₅, o FS atinja o valor mínimo ideal de 1,56 para uma situação de $R_u = 0,5$, e de 1,68 para $R_u = 0$ ou $R_u = 0,3$. Já na configuração final, após a aplicação da camada de 0,5 metro de solo acima do RCD, o menor FS observado entre todas as análises com R_u igual ou menor que 0,5 foi de 1,56, ultrapassando o fator de segurança mínimo ideal estabelecido nesse estudo e indicando uma melhor estabilidade física da região para um cenário permanente.

A nova proposta mostra aumento de até 0,63 no FS, evidenciando ganhos substanciais na estabilidade do talude devido à nova geometria e adição da cobertura superficial (Tabela 9). Por outro lado, apesar de uma maior segurança, a suavização do ângulo de inclinação e

redução na altura das bancadas faz com que o volume disponível para deposição de RCD seja reduzido.

Tabela 9 – Variação dos Fatores de Segurança entre as condições inicial e final do talude.

Filito/Xisto Alterado	RCD	FS (GLE)	FS (GLE)	Ganho no FS
R_u	ϕ (°)	Inicial	Final	
0,0	30	1,17	1,73	0,56
0,3	30	1,17	1,72	0,55
0,5	30	1,17	1,56	0,39
0,7	30	0,93	0,98	0,05
0,9	30	0,42	0,41	-0,01
0,0	35	1,36	1,99	0,63
0,3	35	1,36	1,98	0,62
0,5	35	1,47	1,57	0,10
0,7	35	0,93	0,98	0,05
0,9	35	0,42	0,41	-0,01

Fonte: Autor.

Esse aumento está associado principalmente à alteração geométrica promovida pelo retaludamento, já que os parâmetros geotécnicos foram mantidos constantes entre os cenários. A redução da inclinação média do talude diminui a componente tangencial do peso ao longo da superfície potencial de ruptura, reduzindo as forças mobilizadoras e, consequentemente, elevando o Fator de Segurança.

Por fim, a comparação entre os resultados dos cenários inicial e final revela que, mesmo com a nova geometria, situações com R_u igual ou maior que 0,7 seguem causando instabilidade na região. Isso mostra que a saturação do material é o fator crítico na análise de estabilidade dos taludes da área.

Nesse contexto, os resultados sugerem que o mecanismo provável de ruptura tende a se desenvolver de forma global e profunda, sendo diretamente condicionado pela elevação das pressões neutras. O aumento do parâmetro R_u reduz a tensão efetiva e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento ao longo da superfície potencial de ruptura, favorecendo a instabilização do maciço. Assim, a ruptura observada nos cenários mais críticos é, possivelmente, governada predominantemente pela perda de resistência associada à saturação, e não por acréscimos de carregamento, podendo evoluir de maneira progressiva em condições de longo prazo.

6.3. Implicações práticas e estratégias complementares de estabilização

O cenário de fechamento de uma mina exige soluções passivas, sustentáveis e de baixa manutenção. Para alcançar um cenário satisfatório é possível e, muitas vezes, necessário, utilizar diferentes aproximações, incluindo a suavização geométrica dos taludes da mina, a construção e manutenção de obras para controle de drenagem, a revegetação da área, a construção de estruturas de sustentação, suporte e/ou reforço para os taludes, entre outras soluções. Em paralelo com a estabilização da região, o atual trabalho também buscou soluções para o passivo ambiental gerado a partir da deposição irregular e, consequente, acúmulo de resíduos de construção civil na área.

Diante da situação, o uso de RCD no retaludamento das encostas para fechamento da Mina de Pirita não só é justificável, como também recomendado, desde que feito de forma controlada e consciente. Tal ação possibilitaria uma destinação adequada para o RCD já acumulado na região, além de auxiliar na estabilização dos taludes ali presentes (Dhir *et al.*, 2004; Athira & Kannan, 2023; Corrales *et al.*, 2023; Punetha & Nimbalkar, 2025).

Como discutido em capítulos anteriores, o RCD é um material altamente heterogêneo, tanto no sentido de sua composição, como também em granulometria, incluindo tamanho e forma de partículas. Isso faz com que, naturalmente, esse material seja altamente drenante. Essa característica é benéfica na situação descrita no atual trabalho, principalmente a luz dos resultados que apontam que a presença de água é um fator crítico na estabilidade da encosta que, em todos os cenários avaliados, apresentou instabilidade ($FS < 1$) quando o R_u utilizado foi de 0,7 ou maior. A alta heterogeneidade, por outro lado, gera incertezas no momento da realização dos ensaios e análises. Isso torna necessária uma aproximação mais cautelosa e conservadora na hora de assumir os parâmetros do RCD.

Além da utilização do RCD, a aplicação de uma camada superficial recobrindo o material depositado também é altamente recomendada (Sánchez *et al.*, 2013; Santos, 2017). A camada delgada de solo apresenta inúmeros benefícios, incluindo o aumento comprovado da estabilidade global do talude, além de atuar como regulador de fluxo, reduzindo a velocidade de infiltração de água, e também possibilitar a revegetação. Idealmente o solo utilizado para a cobertura do RCD, em uma situação de fechamento de mina, deveria ser rico em matéria orgânica, a fim de facilitar a revegetação da área. Entretanto, optou-se por considerar uma cobertura utilizando o próprio material disponível na região, ou seja, o solo de alteração de filito/xisto. Apesar de dificultar a revegetação, a opção mostra-se mais viável economicamente, devido a redução de custos e facilidade logística.

Fica evidente que o uso de materiais disponíveis localmente para cobertura, como RCD e o solo de alteração de filito/xisto, está alinhado com estratégias de fechamento sustentável previstas nos guias de planejamento de fechamento de mina, que ressaltam o uso de soluções economicamente e ambientalmente eficientes (Dhir *et al.*, 2004; Sánchez *et al.*, 2013; Santos, 2017; Athira & Kannan, 2023; Punetha & Nimbalkar, 2025).

Os resultados revelaram que a região apresenta alta sensibilidade à saturação, comprovada pela instabilidade dos taludes diante de análises com R_u igual ou maior que 0,7. Para tais situações de alta saturação, mesmo com a utilização de RCD ($R_u = 0$), suavização da geometria do talude e aplicação de uma camada de solo de 0,5 metro acima do RCD, o talude ainda se mostrou instável ($FS < 1$). Isso reforça o benefício da utilização do RCD (altamente drenante) para evitar a saturação do talude, mas também evidencia a necessidade de medidas complementares para reforçar o controle hídrico.

Para auxiliar o controle da saturação do talude, é sugerida a utilização de obras de drenagem, utilização de geotêxtil na interface entre RCD e a camada superficial de solo, biomanta para controle erosivo e, não menos importante, a revegetação da área retaludada. Na prática, essas medidas buscariam um controle e redução do parâmetro R_u , para que o mesmo não ultrapasse 0,5 e não comprometa a estabilidade do talude.

Obras de drenagem superficial visam direcionar o fluxo de água antes que haja infiltração da mesma. Elas são uma barreira de proteção adicional para evitar que a água se infiltre no talude e aumente sua saturação, além de reduzir a erosão por escoamento superficial (Cavalcanti, 2017). A redução da altura e a suavização da inclinação das bancadas atuam em concordância com a utilização de drenos superficiais, uma vez que diminuem a velocidade do escoamento superficial e, associadas ao redirecionamento do fluxo por meio de canais de drenagem, promovem maior controle da erosão causada pela água.

Obras de drenagem subsuperficial, como drenos horizontais profundos (Barcelos *et al.*, 2012), também agregariam no aumento da estabilidade do maciço, principalmente para controle de água no pé do talude e na interface entre o RCD e o solo da encosta original. Sendo o RCD naturalmente drenante, a ausência de drenos subsuperficiais pode resultar na percolação de água pelo RCD e acúmulo no solo de alteração de filito/xisto no pé do talude, aumentando o risco de ruptura global.

O uso de geotêxtil como camada intermediária entre o RCD e a camada de solo superficial também traria benefícios, sendo uma solução sustentável, com material de fácil aplicação, baixo custo e elevado desempenho (Niroumand *et al.*, 2012; Feijó & Araújo, 2024). Com a função de filtro, a camada evita a migração de finos do solo para o RCD, enquanto

permite a passagem de água. Isso reduz o risco de colmatção do RCD e consequente perda de sua capacidade drenante, contribuindo para a manutenção da eficiência hidráulica do RCD e melhor estabilização do sistema.

Por fim, a revegetação é essencial em trabalhos de recuperação de áreas degradadas e deve estar incluída no planejamento de fechamento de uma mina, conforme orientações da Agência Nacional de Mineração e recomendações do IBRAM para recuperação de áreas mineradas (Sánchez *et al.*, 2013; Santos, 2017). Quando utilizado o solo disponível na área, é recomendado realizar correções químicas, calagem e adubação, para melhorar a eficiência da revegetação, além da compactação adequada, evitando solos muito compactos que dificultariam o desenvolvimento de raízes. Além disso, a utilização de biomantas sobre a camada superficial de 0,5 metro de solo seria ideal para garantir o controle erosivo, favorecendo o estabelecimento da cobertura vegetal. A biomanta serviria como uma solução temporária, agindo como proteção para as sementes e o solo recém aplicado (Silva & Paschoalin Filho, 2018; Alves, 2023; Uzeda *et al.*, 2024).

O conjunto das soluções discutidas apresenta potencial para promover impacto positivo considerável na estabilização dos taludes da Mina de Pirita, contribuindo para o seu fechamento sob uma perspectiva de estabilidade permanente e recuperação ambiental. Tais medidas estão alinhadas aos princípios do fechamento de mina, que buscam garantir a segurança física, o controle dos processos erosivos e a sustentabilidade ambiental da área após o encerramento das atividades.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho partiu da problemática associada a uma encosta da antiga Mina de Pirita, em Ouro Preto, marcada por processos erosivos ativos, histórico de instabilidades e ausência de medidas sistemáticas de recuperação após o encerramento de suas atividades. Paralelamente, considerou-se a presença de deposições irregulares de RCD na área, configurando a coexistência de dois passivos ambientais distintos. Diante desse cenário, definiu-se como objetivo avaliar, por meio de análises de estabilidade, a viabilidade de diferentes geometrias de retaludamento e a utilização do RCD como material em intervenções de reconfiguração geométrica, buscando conciliar segurança geotécnica, controle de instabilidades e reaproveitamento sustentável de resíduos.

Considerando que os parâmetros geotécnicos adotados foram obtidos a partir da literatura, os fatores de segurança apresentados ao longo deste trabalho devem ser interpretados como indicadores da tendência de comportamento dos cenários analisados. Assim, os valores absolutos obtidos refletem as incertezas associadas às premissas adotadas, devendo ser compreendidos como resultados de caráter preliminar.

Os resultados das análises de estabilidade do cenário atual da encosta estudada mostram um FS de, no máximo, 1,47 para cenários com R_u igual ou menor que 0,5. Isso confirma que, apesar de estável, a encosta não atingiu o FS mínimo recomendado para um contexto de fechamento de mina e, por conta disso, é justificável a realização de obras de retaludamento, visando uma melhor estabilidade para a região. Entretanto, ao projetar a altura média e inclinação de bancadas que vem sendo empregados no retaludamento pela empresa que atua na região (altura = 5,35 metros, inclinação = 34°), os resultados revelam que não houve melhora significativa na estabilidade do talude, refletida no FS que segue abaixo de 1,5 para todos os cenários variando R_u de 0 a 0,9. Logo, fez-se necessária a reconfiguração da geometria dos taludes, modificando valores de altura e inclinação das bancadas.

Verificou-se, ainda, com os resultados das análises da nova geometria proposta, com altura de bancada de 5 metros e inclinação de 30°, que a nova configuração geométrica conseguiu elevar o FS para valores de até 1,68 e, portanto, alcançar o FS mínimo desejável. Além disso, os resultados confirmam que a adição de uma camada de solo de 0,5 metro sobre o RCD melhoraria ainda mais a estabilidade do talude, que alcançaria nesse cenário um FS de até 1,99. Tais resultados foram favoráveis e suportam a conclusão de que é possível e viável a utilização de RCD em obras de estabilização de encostas.

Analisando os diferentes resultados fica claro, também, que não há mudanças no cenário de instabilidade para situações cujo fator R_u assume valores de 0,7 ou superiores, evidenciando que a área apresenta uma alta sensibilidade à saturação. Essa vulnerabilidade pode ser assumida como o ponto crítico para estabilização das encostas na área da Mina de Pirita, comprovando que a mudança na geometria pode não ser suficiente, o que justificaria a necessidade de obras de engenharia adicionais para proporcionar maior controle hídrico para o talude.

A realização de obras de drenagem superficial e subsuperficial seriam importantes para controlar a saturação do maciço, redirecionando o fluxo de água e evitando seu acúmulo, principalmente no pé do talude. O uso de geotêxtil seria indicado para agir como filtro, evitando a passagem de partículas finas do solo superficial para o RCD, o que poderia causar colmatagem e perda das propriedades drenantes do RCD. A revegetação segue sendo essencial na etapa de fechamento de mina e recuperação de áreas degradadas, e o uso de biomantas pode potencializar sua aplicação, proporcionando maior controle erosivo e protegendo as sementes e o solo recém aplicado.

Por fim, no âmbito de estabilização da encosta, o trabalho conclui que a mudança na geometria melhorou a estabilidade do talude, a cobertura de solo contribui para tal, mas que a condição hídrica segue sendo o fator crítico na área da Mina de Pirita, o que justifica a recomendação da execução de obras adicionais de engenharia, como drenagens, uso de geotêxtil e aplicação de biomanta para controle de saturação e erosão do talude e consequente aumento de sua estabilidade a longo prazo. Em relação ao uso de RCD, verifica-se que é possível sua utilização para obras de retaludamento, que sua característica de material altamente drenante colabora para a estabilização e controle hídrico do talude, e que destinar RCD para tais fins se mostra uma prática sustentável, diminuindo o passivo ambiental gerado pela deposição não controlada desses resíduos.

7.1. Sugestões de estudos futuros

A principal limitação do atual trabalho se concentrou na necessidade de fazer premissas em relação aos parâmetros dos materiais envolvidos nas análises, uma vez que os valores utilizados foram obtidos a partir de referências bibliográficas. Entende-se que, atualmente, não há um método eficaz para definição de parâmetros geotécnicos de RCD e que esse material é altamente heterogêneo em sua composição e granulometria.

Dessa forma, recomenda-se que, para continuidade e maior confiabilidade de estudos futuros realizados na região, sejam realizadas etapas de campo, coleta de amostras

representativas e ensaios laboratoriais, tais como ensaios de cisalhamento, adensamento e permeabilidade, para definição mais assertiva de parâmetros de resistência e deformabilidade dos materiais.

Recomenda-se, também, que estudos futuros realizem um maior número de análises, variando parâmetros diversos, além do fator R_u do solo de alteração de filito/xisto e do ângulo de atrito do RCD, como feito nesse estudo. Assim, talvez seja possível identificar outro parâmetro que exerça influência considerável nas análises de estabilidade da região.

Adicionalmente, sugere-se a realização de análises tridimensionais de estabilidade, por meio de modelagem em ambiente 3D, a fim de considerar efeitos espaciais não capturados em análises bidimensionais, como variações laterais de geometria e condições de contorno. Esse tipo de abordagem teria o potencial para fornecer uma representação mais realista do comportamento do talude.

Por fim, destaca-se a importância da realização de análises de fluxo e percolação de água no maciço, com o objetivo de avaliar os caminhos preferenciais de escoamento e infiltração. Essas análises poderiam ser inicialmente direcionadas ao solo de alteração de filito/xisto, considerando a dificuldade de caracterização hidráulica de materiais heterogêneos como o RCD. Os resultados, associados à determinação dos coeficientes de permeabilidade dos materiais, permitiriam uma representação mais realista do regime hidráulico. Caso o fluxo ocorra predominantemente ao longo do contato entre os materiais e com limitada infiltração no solo de alteração, a elevação significativa das pressões neutras, representada neste trabalho por valores do parâmetro $R_u \geq 0,7$, pode não se concretizar em campo. Tal condição poderia alterar a configuração das superfícies potenciais de ruptura e os resultados das análises de estabilidade, permitindo uma aproximação menos conservadora e mais condizente com o comportamento real da encosta nas obras de retaludamento da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de encostas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- ABRAMSON, L.W.; LEE, T.S.; SHARMA, S.; BOYCE, G.M. **Slope Stability and Stabilization Methods**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, Amsterdam, n. 90, p. 29-58, 1998.
- ALKMIM, F. F.; NOCE, C. M.. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509, Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. **Field Guide & Abstracts**, 114 p, 2006.
- ALMEIDA, F. F. M. Estruturas do Precambriano Inferior Brasileiro. **Congresso Brasileiro de Geologia**, 29. Resumo dos Trabalhos, Ouro Preto, p. 201-202, 1976.
- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.
- ALVES, G. G. **Utilização da biomanta de fibra de coco como técnica de bioengenharia para o controle de erosão em taludes**. 2023. 69 f. Monografia – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.
- ARAÚJO, H.A.O.; SOUZA JÚNIOR, A.; DANTAS FILHO, M.D. MAIA, Y.W.A.; BARROS, J.P.B. Estudo de Aproveitamento do Resíduo de Contrução e Demolição (RCD) em Barragem de Terra Homogênea. In: **CONAPESC – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências**, v. 5. Anais. Florianópolis/SC: UFSC, 2020.
- ATHIRA V. R.; KANNAN, K. Evaluating the Feasibility of using Construction and Demolition Waste in Subgrade. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology**. v. 11, Issue IV, 2023.
- ÁVILA, C. R. **Determinação das Propriedades Mecânicas de Maciços Rochosos e/ou Descontinuidades Utilizando Classificações Geomecânicas – Uma Comparação Entre os Diversos Métodos de Classificação**. 2012. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- BABINSKI, M.; CHEMALE, F. Jr.; SCHUMUS, W. R. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Precambrian Research**, v. 72, p. 235-245, 1995.
- BARBOSA, A. L. M. **Contribuições recentes à Geologia do Quadrilátero Ferrífero**. 1968. 68 f. Monografia - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1968.
- BARCELOS, C. V.; NUNES, F. S.; CALDAS, F. V., BENEVIDES, E. F. S.; GRANDCHAMP, C. A. P. O uso de Drenos Horizontais Profundos e a Estabilidade de Taludes. In: **XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**. Bonito/MS, 2012
- BASTO, C. F. **Carta Geológica da Folha Mariana. Projeto: Estratigrafia, Arquitetura Crustal e Recursos Minerais do Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte: SGB/CPRM, 2023. 1 mapa. Escala 1:25.000.

- BISHOP, A.W.; MORGENSTERN, N. Stability coefficients for earth slopes. **Geotechnique**, v.10, n. 4, p. 129-153. 1960.
- BITAR, O. Y.; BRAGA, T. O. O meio físico na recuperação de áreas degradadas. In: BITAR, O. Y. (org), **Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Geologia, p. 165-179, 1995.
- BOSSINK, B. A. G.; BROUWERS, H. J. H. Construction Waste: Quantification and Source Evaluation. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 122, n. 1, p. 55-60, 1996.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília:, DF, 17 jul. 2002.
- BRITO, J.A. Cidade versus entulho. **Areia&Brita**, p. 22-26, 1998.
- CABRAL, A. R.; ZEH, A.; TUPINAMBÁ, M.; PIMENTA, J. First evidence for Neoproterozoic magmatism in the Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, and geotectonic implications. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 104, 2020.
- CARNEIRO, M. A. **O Complexo Metamórfico do Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, MG**: litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano. 1992. 233 f. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- CARNEIRO, A.P.; CASSA, J.C.; BRUM, I.A. de; COSTA, A.D.B. Construction waste characterisation for production of recycled aggregate - Salvador/Brazil. **Waste Management Series**, Elsevier, v. 1, 2000.
- CAVALCANTI, M. M. **Estabilização de Encostas com Proteção Superficial e Drenagem Superficial e Profunda**. 2017. 99 f. Monografia – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- CORRALES, L.A.G.; PIEROZAN, R.C.; ARAÚJO, G.L.S.; PALMEIRA, E.M. Evaluation of Construction and Demolition Waste and Other Alternative Fills for Strip-Reinforced Soil Walls. **Sustainabilit**, v. 15, n. 9705, 2023.
- DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Cengage Learning, 2007. 612 p.
- DHIR, R. K.; PAINE, K. A.; DYER, T.D. Recycling and reconstitution of construction and demolition waste. **Paper presented at International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling**, London, UK, 2004.
- DHIR, R.; BRITO, J.; SILVA, R.V.; QUNLYE, C. Use of Recycled Aggregates in Geotechnical Applications. In: **Sustainable Construction Materials Recycled Aggregates**, Duxford/UK: Woodhead Publishing, p. 419–450, 2019.
- DI MARIA, A.; EYCKMANS, J.; VAN ACKER, K. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: combining LCA and LCC to support sustainable policy making. **Waste Management**, v. 75, p. 3–21, 2018.
- DORR, J. V. N. II. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington: U.S Geological Survey Professional Paper, 641-A, p. 110, 1969.

- DORR, J. V. N. II.; GAIR, J. E.; POMERENE, J. B.; RYNEARSON, G. A. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Rio de Janeiro: DNPM/DFPM, Avulso, v. 81, p. 31, 1957.
- DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S.G. BRANDON, L.T. **Soil Strength and Slope Stability**, 2. ed. John Wiley and Sons, Inc., 2014.
- ENDO, I.; CASTRO, P. T. A.; GANDINI, A. L. Quadrilátero Ferrífero: Avanços do conhecimento nos últimos 50 anos. Belo Horizonte, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 470-483, 2020.
- FARINA, F.; ROSIÈRE, C.A.; NALINI JR., H.A. The Archean evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Precambrian Research**, v. 275, p. 53–76, 2016.
- FEIJÓ, V.S.; ARAÚJO, G.L.S. Avaliação do Uso de Geocomposto como Camada Drenante em Obras de Geotecnia. In: **XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. – Cobramseg**. Balneário Camboriú/SC: ABMS, 2024.
- FELLENIUS, W. Calculation of the Stability of Earth Dams. **Proceedings of the Second Congress of Large Dams**, v. 4, p. 445-463, 1936.
- FERNANDES, M. M. **Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR, 2009.
- FREDLUND, D.G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 14, n. 3, p. 429-439, 1977.
- FREDLUND, D.G.; KRAHN, J.; PUFAHL, D. The relationship between limit equilibrium slope stability methods. **Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.** (Stockholm, Sweden), v. 3, p. 409-416, 1981.
- GAIR, J. E.. The Sabará Formation. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 7, n. 2, p. 68-69, 1958.
- GAIR J. E.. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Washington: U.S Geological Survey Professional Paper, 341(A), p. 111, 1962.
- GARCIA, F. A. F.; IYOMASA, W. S. Contribuição Acerca dos Parâmetros Geomecânicos do Filito Itaberaba em Condições Específicas. In: **18º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. Belo Horizonte/MG, 2025.
- GASPARETO, M. G. T. **Utilização de Resíduos de Construção Civil e Demolição (RCD) como material não plástico para a produção de tijolos cerâmicos**. 2017. Monografia – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2017.
- GAVILAN, R. M.; BERNOLD, L. E. Source Evaluation of Solid Waste in Building Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 120, Issue 3, 1994.
- GRIFFITH, J. J. Recuperação conservacionista de superfícies mineradas: uma revisão bibliográfica. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1980. 51 p. (SIF. Boletim Técnico, 2)

- HARTMANN, L. A.; SANTOS, J. O. S.; BOSSI, J. Temporal evolution of the Supergroup Minas, Brazil. **Precambrian Research**, v. 99, p. 25–54, 2000.
- HERZ, N. Gneissic and Igneous Rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S Geological Survey/DNPM Professional Paper, 641(B), p. 1-57, 1970.
- HONORATO, J. P. **Avaliação dos Condicionantes Geomecânicos-Estruturais e Geomorfológicos de Voçorocas em Filito, na Porção Centro-Sul do Quadrilátero Ferrífero, MG**. 2012. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.
- IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Guia de indicadores para planejamento do fechamento de mina: ferramenta para avaliação do desempenho na gestão do fechamento de mina**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2024.
- ICMM - INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS. **Integrated Mine Closure: Good Practice Guide**. 3.ed. London: ICMM, 2025.
- JANBU, N. Applications of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis. In: **Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes**, Stockholm, v. 3, p. 39-43, 1954.
- JOPPERT JR, I. **Fundações e Contensões de Edifícios: Qualidade Total na Gestão do Projeto e Execução**. São Paulo: Pini, 2007.
- KONSTANTOPOULOU, G.; SPANOU, N. Stability analysis of construction and demolition waste (CDW) deposits in the abandoned quarry of Profitis Ilias, Kozani, Greece. **Bulletin of the Geological Society of Greece**. v. 47, 2013.
- KRAHN, J. The 2001 R.M. Hardy Lecture: The Limits of Limit Equilibrium Analyses. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40. p. 643-660, 2003.
- LABUZ, J. F.; ZANG, A. Mohr–Coulomb Failure Criterion. **Rock Mechanics and Rock Engineering**. v. 45, n. 6, p. 975–979, 2012.
- LACOURT, F. Barita e pirita no município de Ouro Preto - Minas Gerais. **Revista Mineração e Metalurgia**, v. II, n. 11, p. 298-301, 1938.
- LADEIRA, E. A. Gênese de ouro na Mina de Morro Velho e no Distrito de Nova Lima, Minas Gerais, Brasil. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**, 31, Anais. Camboriú, 1980.
- LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. SI Version. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- LUKIANCHUKI, J.; OLIVEIRA, J. R.; ALMEIDA, M.; SILVA, T.; GUIDELI, L. Construction and demolition waste (CDW) used in reinforced soil mixtures for pavement applications. **XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering**. Reykjavik, 2019.
- MACHADO, N.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; RENGGER, F. E. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma. de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, 1993.
- MACHADO, N.; SCHRANK, A.; NOCE, C. M.; GALTHIER, G. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. **Earth Planet. Sci. Lett**, v. 141, p. 259-276, 1996.

- MARSHAK, S.; ALKMEM, F. F. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. **Tectonics**, v. 8, n. 3, p. 553-571, 1989.
- MAXWELL C. H.; SIMMONS G. C. The Batatal Formation. **Boletim da Sociedade Brasileira De Geologia**. São Paulo, v. 7, p. 60-61, 1958.
- MORAES, N. C. de; SILVA, J. M. da; LIMA, H. M. Uso de entulho de construção civil como sistema de cobertura para abatimento de drenagem ácida de mina em uma mina abandonada de pirita. **Revista da Escola de Minas**, v. 64, p. 213-218, 2011.
- MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. **Geotechnique**, v. 15, p. 79-93, 1965.
- NIROUMAND, H.; KASSIM, K.A.; GHAFORIPOUR, A.; NAZIR, R. The role of geosynthetics in slope stability. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**. v. 7, p. 2739-2746, 2012.
- NOCE, C. M. **Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 1995. 128 f. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- OLIVEIRA, L.D. **Ocupação urbana de Ouro Preto de 1950 a 2004 e atuais tendências**. 2010. 151 f. Dissertação de mestrado – Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.
- OLIVEIRA, P.; SANTOS, E. C. G dos. Caracterização Geotécnica de uma areia reciclada para uso em estruturas de solo reforçado (ESR) com geossintéticos. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 1, 2023.
- OLIVEIRA, L. F.; MIRANDA, T. C.; RONCATO JÚNIOR, J. G. Caracterização Geotécnica e Petrográfica de Filitos dos Grupos Sabará e Piracicaba no Quadrilátero Ferrífero: Implicações para a Estabilidade de Taludes. In: **COBRAE/GEOSUL (IX Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas/XIV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul)**, Garibaldi/RS, 2025.
- PARIZZI, M. G.; SOBREIRA, F. G.; GALVÃO, T. C. B.; ARANHA, P. R. A.; ELMIRO, M. A. T.; BEIRIGO, E. A. Processos de movimentos de massa em Belo Horizonte, MG. **Revista Geografias**, v. 7, n. 1, p. 58–87, 2011.
- PINTO, T. P. **Utilização de resíduos de construção: estudo do uso em argamassas**. 1986. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.
- PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**: em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- POMERENE, J. B. The Cercadinho Formation. In: Symposium on the stratigraphy of the Minas series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 7, n. 2, p. 64–65, 1958a.
- POMERENE, J. B. Taboões Quartzite. In: Symposium on the stratigraphy of the Minas series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 7, n. 2, p. 66–67, 1958b.
- POMERENE, J. B. The Barreiro Formation. In: Symposium on the stratigraphy of the Minas series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 7, n. 2, p. 67–68, 1958c.

- POURKHORSHIDI, S.; SANGIORGI, C.; TORREGGIANI, D.; TASSINARI, P. Using Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Unbound Layers of Pavements. **Sustainability**, v.12, 2020.
- PUNETHA, P.; NIMBALKAR, S. Utilization of construction and demolition waste and recycled glass for sustainable flexible pavements: A critical review. **Transportation Geotechnics**. v. 54, 2025.
- REMÉDIO, F. H. **Análise da estabilidade de taludes de aterro de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com Nspt**. 2014. 131 f. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2014.
- RENGER, F. E.; NOCE, C. M.; ROMANO, A. W.; MACHADO, N. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro Geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**, v. 2, n. 1, p. 1-11, 1994.
- RODRIGUES, S.; SATHLER, L.; ROCHA, G.; LOURES, S. Caracterização Geológico-Geotécnica dos Solos de Alteração do Filito Dolomítico Provenientes da Formação Fecho do Funil, Sinclinal Moeda, Quadrilátero Ferrífero, MG. **Comitê Brasileiro de Barragens. XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**, Foz do Iguaçu, 2023.
- SÁNCHEZ, L. E.; SILVA-SÁNCHEZ, S. S.; NERI, A. C. Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina. Brasília: **Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM)**, 2013.
- SANTOS, E. C. G. dos. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação de mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- SANTOS, J. A. G. Recuperação e reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Cruz das Almas/BA: UFRB, 2017. 44p.
- SCHORSCHER, H. D. Komatiitos na estrutura "Greenstone Belt" Serie Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. In: **SBG, Congresso Brasileiro de Geologia**, 30. Resumo dos Trabalhos, Recife, p. 292-293, 1978.
- SEEQUENT LIMITED, THE BENTLEY SUBSURFACE COMPANY. **Stability Modeling with GeoStudio (SLOPE/W)**, 2022.
- SHARMA, A.; SHRIVASTAVA, N. Geotechnical Characterization of Construction and Demolition Waste Material Blended with Sandy Soil. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 9, n. 43, 2023.
- SILVA, J. C. G. da; PASCHOALIN FILHO, J. A. Estudo comparativo entre técnicas de proteção superficial de taludes situados na Rodovia SP-563: Biomanta, Hidrossemeadura e Grama em Placa. In: **VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovações e Sustentabilidade – SINGEP**. São Paulo/SP. Anais, 2018.
- SILVA, R. C.; COSTA, D. P.; EHRLICH, M. Movimentação de Rastejo e Proposta de Estabilização de um Depósito de Solo Residual de Filito. In: **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg**. Salvador/BA: ABMS, 2018.
- SILVA, R. V.; de BRITO, J.; DHIR, R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **J. Clean. Prod.**, 2019.

- SILVA, R. C.; GOMES, T. B. G.; EHRLICH, M.; COSTA, D. P. Comportamento de um Maciço em Solo Residual de Filito adjacente a uma Cava de Mineração no Quadrilátero Ferrífero. In: **XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – Cobramseg**. Campinas/SP: ABMS, 2020.
- SILVEIRA, R. R. **Caracterização Geotécnica para Fins de Fechamento de uma Mina Abandonada – Estudo de Caso de uma Mina de Pirita em Ouro Preto/MG**. 2020. 91 f. Dissertação de Mestrado – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- SIMMONS, G. C. The Fecho do Funil Formation. **Sociedade Brasileira de Geologia**. v. 7, n. 2, p. 65-66, 1958.
- SIMMONS, G. C. Geology and ore deposits of the Western Serra do Curral, Minas Gerais, Brazil. U.S Geological Survey Professional Paper, 341-G, p. 57, 1968.
- SOUZA, U. E. L. de; AGOPYAN, V.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. de. **Anais do Simpósio Nacional Desperdício de Materiais nos Canteiros de Obras: a quebra do mito**. São Paulo: Ep-usp/PCC, 1999.
- SOUZA, H. A. **Avaliação de Movimento de Massa do Tipo Rastejo em Talude no Bairro São Cristovão, Ouro Preto (MG)**. 2015. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- SOUZA, H. A.; PEREIRA, L.; LIMA, A.; RESENDE, F.; SILVA, J. V. Compilação de parâmetros de resistência do quadrilátero ferrífero. In: **XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. – Cobramseg**. Balneário Camboriú/SC: ABMS, 2024.
- SPENCER, E. A Method of Analysis of Embankments assuming Parallel Inter-slice Forces. **Geotechnique**, v. 17, n. 1, p. 11-26, 1967.
- STARK, T. D.; HUVAJ-SARIHAN, N.; LI, G. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. **Environ Geol**, v. 57, p.1911-1923, 2009.
- TAVARES, R. B.. NOGUEIRA, N. R. M. L.; VOLPONI, I. Q. Deslizamento de solo/aterro - Estudo de Caso: Vila Bandeirantes – Belo Horizonte, MG. In: **16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. São Paulo, 2018.
- TEIXEIRA, W. **A evolução geotectônica da porção meridional do cráton do São Francisco, com base em interpretações geocronológicas**. 1985. 207 f. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Mecánica de suelos en la ingeniería práctica**. 2. ed. Buenos Aires: El Ateneo, 1986.
- TERZAGHI, K.; PECK, R. B.; MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- UZEDA, C. S.; ARAÚJO, I. I. B. de; GUERRA, J. V. F.; JESUS, T. C. de; SANTOS, W. S. Estabilização de taludes com biomanta de fibra de coco. **Facere Scientia**, v. 04, n. 02, 2024.
- VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**, 1.ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.
- WALLACE, R. M. The Moeda Formation. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 2, n. 7, p. 59-60, 1958.

**APÊNDICE A – TABELAS COMPLETAS DOS PARÂMETROS DE ENTRADA E
RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DE ESTABILIDADE**

Tabela 10 - Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 1: Geometria Original.

Análise nº	Cenário	Filito/Xisto Alterado				Resíduos de Construção Civil				Surface Type	Fator de Segurança		
		γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	R_u	γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	R_u		GLE / M-P	Spencer	Janbu C.
1	Geometria Original	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Circular	1,19	1,19	1,19
2	Geometria Original	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,17	1,18	1,17
3	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Circular	1,19	1,19	1,19
4	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,17	1,18	1,17
5	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Circular	1,19	1,19	1,19
6	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,17	1,18	1,17
7	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Circular	0,95	0,96	0,92
8	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,93	0,94	0,91
9	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Circular	0,44	0,44	0,39
10	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,42	0,43	0,38
11	Geometria Original	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Circular	1,39	1,39	1,39
12	Geometria Original	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,36	1,38	1,37
13	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Circular	1,39	1,39	1,39
14	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,36	1,38	1,37
15	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Circular	1,49	1,5	1,48
16	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,47	1,48	1,47
17	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Circular	0,95	0,96	0,92
18	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,93	0,94	0,91
19	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Circular	0,44	0,44	0,39
20	Geometria Original	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,42	0,43	0,37

Onde: γ = peso específico; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; M-P = Morgenstern-Price.

Tabela 11 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 2: Projeção de Geometria das Bancadas Existentes.

Análise nº	Cenário	Filito/Xisto Alterado				Resíduos de Construção Civil				Surface Type	Fator de Segurança		
		γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru	γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru		GLE / M-P	Spencer	Janbu C.
21	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Circular	1,27	1,27	1,27
22	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,26	1,27	1,26
23	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Circular	1,27	1,27	1,27
24	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,26	1,27	1,26
25	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Circular	1,27	1,27	1,27
26	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,26	1,27	1,26
27	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Circular	0,93	0,94	0,91
28	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,92	0,93	0,9
29	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Circular	0,41	0,41	0,36
30	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,38	0,4	0,35
31	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Circular	1,48	1,48	1,48
32	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,47	1,48	1,47
33	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Circular	1,48	1,48	1,48
34	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,47	1,48	1,47
35	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Circular	1,5	1,5	1,5
36	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,47	1,48	1,48
37	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Circular	0,94	0,94	0,91
38	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,92	0,93	0,91
39	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Circular	0,41	0,41	0,36
40	Projeção de Taludes atuais	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,38	0,4	0,35

Onde: γ = peso específico; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; M-P = Morgenstern-Price.

Tabela 12 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 3: Nova Geometria Proposta.

Análise nº	Cenário	Filito/Xisto Alterado				Resíduos de Construção Civil				Surface Type	Fator de Segurança		
		γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru	γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru		GLE / M-P	Spencer	Janbu C.
41	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Circular	1,44	1,44	1,45
42	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,43	1,45	1,44
43	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Circular	1,44	1,44	1,45
44	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,43	1,45	1,44
45	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Circular	1,45	1,45	1,46
46	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,44	1,45	1,45
47	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Circular	1	1	0,98
48	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,98	0,99	0,97
49	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Circular	0,43	0,44	0,39
50	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,41	0,43	0,38
51	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Circular	1,69	1,69	1,7
52	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,68	1,69	1,69
53	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Circular	1,69	1,69	1,7
54	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,68	1,69	1,69
55	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Circular	1,59	1,59	1,6
56	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,56	1,58	1,58
57	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Circular	1	1	0,98
58	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,98	0,99	0,97
59	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Circular	0,43	0,44	0,39
60	Nova Geometria Proposta	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,41	0,43	0,38

Onde: γ = peso específico; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; M-P = Morgenstern-Price.

Tabela 13 – Parâmetros geotécnicos adotados e fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade do Cenário 4: Geometria Final.

Análise n°	Cenário	Filito/Xisto Alterado				Resíduos de Construção Civil				Surface Type	Fator de Segurança		
		γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru	γ [kN/m³]	c [kPa]	ϕ [°]	Ru		GLE / M-P	Spencer	Janbu C.
61	Geometria Final	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Circular	1,77	1,77	1,75
62	Geometria Final	18,03	25	35,44	0	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,73	1,76	1,73
63	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Circular	1,76	1,76	1,74
64	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,72	1,75	1,72
65	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Circular	1,59	1,59	1,6
66	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	30	0	Non-Circ.	1,56	1,58	1,58
67	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Circular	1	1	0,98
68	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,98	0,99	0,97
69	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Circular	0,43	0,44	0,4
70	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	30	0	Non-Circ.	0,41	0,43	0,38
71	Geometria Final	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Circular	2,04	2,04	2,02
72	Geometria Final	18,03	25	35,44	0	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,99	2,02	1,99
73	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Circular	2,03	2,03	2,02
74	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,3	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,98	2,04	1,99
75	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Circular	1,59	1,6	1,6
76	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,5	20	2,5	35	0	Non-Circ.	1,57	1,58	1,58
77	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Circular	1	1,01	0,98
78	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,7	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,98	1	0,97
79	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Circular	0,43	0,44	0,4
80	Geometria Final	18,03	25	35,44	0,9	20	2,5	35	0	Non-Circ.	0,41	0,43	0,38

Onde: γ = peso específico; c = coesão; ϕ = ângulo de atrito; M-P = Morgenstern-Price.