

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Departamento de Engenharia de Minas
Especialização em Recursos Minerais

Maike de Souza Assis

ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES E MODOS DE RUPTURA DE
DEPÓSITO DE ARGILA REFRAATÁRIA

Belo Horizonte
2022

Maíke de Souza Assis

**ANÁLISE DAS DESCONTINUIDADES E MODOS DE RUPTURA DE
DEPÓSITO DE ARGILA REFRAATÁRIA**

Monografia de especialização
apresentada ao departamento de
engenharia da Universidade Federal
de Minas Gerais, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Especialista em Recursos Minerais

Orientador: Prof. Leandro Azevedo da
Silva

Belo Horizonte
2022

ATA DE DEFESA

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS CURSO DE ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS	
---	---	---

ATA DA DEFESA DA MONOGRAFIA DO ALUNO MAIKE DE SOUZA ASSIS

Realizou-se, no dia 14 de novembro de 2022, às 15:30 horas, na Plataforma Teams, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa da Monografia, intitulada "**Análise e das descontinuidades e modos de ruptura de depósito de Argila refratária**", a apresentada por MAIKE DE SOUZA ASSIS, número de registro 2020720030, graduado no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Leandro Azevedo da Silva - Orientador, Prof. Alizeibek Saleimen Nader (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof. Pedro Benedito Casagrande (Universidade Federal de Minas Gerais).

A Comissão considerou a defesa da monografia:

☒ Aprovada

☐ Reprovada

Nota: 8,5

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 14 de novembro de 2022.


Prof. Leandro Azevedo da Silva (Mestre)


Rildo Magalhães Papini
Orientador do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais


Prof. Alizeibek Saleimen Nader (Doutor)


Aurro Domingos
Secretário do Curso de Especialização
em Engenharia de Recursos Minerais


Prof. Pedro Benedito Casagrande (Doutor)

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Leandro Azevedo, meu orientador, pela sua atenção e apoio durante a preparação do trabalho.
- Aos colegas de trabalho pelo incentivo.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.

RESUMO

As Argilas refratárias são amplamente utilizadas na indústria como matéria- prima para a fabricação de refratários de sílico-aluminosos, como revestimentos para determinados tipos de fornos industriais. Além disso, essas argilas são amplamente utilizadas na produção de tijolos isolantes para lareiras, churrasqueiras e fornos domésticos, bem como na fabricação de certos tipos de cerâmicas e revestimentos cerâmicos, além de vidros e argamassas especiais (cimentos refratários). Foram retratadas as aplicações na indústria de refratários, ocorrência geológica e origem, depósitos importantes em minas gerais, aspectos econômicos, dados de reservas e produção, além das características do setor industrial de produtos refratários. Também foram abordados os modos de falhas e a importância da correta identificação com as respectivas análises cinemáticas. No trabalho de campo foram realizados levantamentos das descontinuidades e calculada probabilidade de ruptura (planar, cunha e tombamento) de todos os taludes, sendo identificada alta probabilidade de ruptura em alguns trechos (acima de 59%). Sugere-se um estudo mais detalhado em que simulações alterando a direção e mergulho dos taludes possam ser avaliadas, assim como a necessidade de realização de ensaios específicos para caracterização das estruturas presentes na Cava.

Caso a cava apresente um projeto de expansão ou tenha sua lavra aumentada consideravelmente (em profundidade), novos estudos devem ser realizados visando o impacto dessa alteração.

Palavras-chave: argila; refratária; descontinuidades; rupturas.

ABSTRACT

Refractory clays are widely used in industry as raw material for the manufacture of silico-aluminous refractories as linings for certain types of industrial kilns. In addition, these clays are widely used in the production of insulating bricks for fireplaces, barbecues and domestic ovens, as well as in the manufacture of certain types of ceramics and ceramic linings, and of special glasses and mortars (refractory cements). Applications in the refractory industry, geological occurrence and origin, important deposits in general mines, economic aspects, data on reserves and production, and the characteristics of the refractory products industrial sector were portrayed. Also discussed were the failure modes and the importance of correct identification with the respective kinematic analyses. In the field work discontinuities were surveyed and the probability of rupture (planar, wedge and overturning) of all slopes was calculated, and a high probability of rupture was identified in some sections (above 59%). It is suggested a more detailed study in which simulations changing the direction and dip of the slopes can be evaluated, as well as the need for specific tests to characterize the structures present in the pit.

If the pit presents an expansion project or has its mining increased considerably (in depth), new studies should be conducted to assess the impact of this change.

Keywords: clay; refractory; discontinuities; rupture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rota para unidade RHI Magnesita. Maxar Technologies (2022)	11
Figura 3.1.1: Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 3.1.3. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.	14
Figura 3.2.1.1: Forno de argila refratária para produção de carvão vegetal. Foto: A Lavoura.....	18
Figura 3.2.3.1: Exemplos de argilas cauliníticas – Santa Maria de Itabira/MG Fotos: MF Rural	19
Figura 3.2.4.1: Argila Bauxítica, recurso mineral refratário Foto: Tecnologia é (Acesso em 24/06/2022).....	20
Figura 3.2.6.2.1: Evolução do volume das reservas medidas e lavráveis de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa et al. 2017).	22
Figura 3.2.6.2.2: Evolução da produção bruta e beneficiada de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa et al. 2017).....	23
Figura 4.5.1: Exemplo de abertura e preenchimento de descontinuidades. Modificado de ISRM (1978).....	26
Figura 5.1.1: Mecanismos de ruptura circular e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)	27
Figura 5.2.1: Mecanismos de ruptura planar e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)	28
Figura 5.3.1: Vista rompimento em cunha na Cava Funchal – Autor (2022)	28
Figura 5.4.1: Mecanismos de ruptura por tombamento e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981).....	29
Figura 6.2.1: Vista superior da Cava Funchal – Autor (2022)	31
Figura 6.2.2: Vista frontal Cava Funchal – Autor (2022)	31
Figura 6.2.1.1: Probabilidade histórica mensal de precipitação em Itabirito – (WeatherSpark.com 2022).....	32
Figura 6.2.1.2: Orientação da descontinuidade. – Maia (2003)	33
Figura 6.2.1.3: Levantamento do Mergulho das Descontinuidades – Autor (2022)	33
Figura 6.2.1.4: Vista frontal da face do Talude Norte – Autor (2022)	34
Figura 6.3.2.1: Análise cinemática para cunha talude norte - Autor (2022)	36
Figura 6.3.2.2: Análise cinemática para planar talude norte - Autor (2022)	37
Figura 6.3.2.3: Análise cinemática para tombamento talude norte - Autor (2022)	37
Figura 6.3.3.1: Análise cinemática para cunha talude sul - Autor (2022).....	38
Figura 6.3.3.2: Análise cinemática para planar talude sul - Autor (2022)	38
Figura 6.3.3.3: Análise cinemática para tombamento talude sul - Autor (2022)	39
Figura 6.3.4.1: Vista frontal talude leste - Autor (2022)	40
Figura 6.3.4.2: Análise cinemática para cunha talude leste - Autor (2022)	40
Figura 6.3.4.3: Análise cinemática para planar talude leste - Autor (2022).....	41
Figura 6.3.4.4: Análise cinemática para tombamento talude leste - Autor (2022).....	41
Figura 6.3.5.1: Ruptura em cunha talude oeste - Autor (2022)	42
Figura 6.3.5.2: Análise cinemática para cunha talude oeste - Autor (2022)	42
Figura 6.3.5.3: Análise cinemática para planar talude oeste - Autor (2022)	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.3.5.4: Análise cinemática para tombamento talude oeste - Autor (2022).....	43
Figura 7.1: Análise cinemática para Cunha slope dip 41 talude oeste - Autor (2022)....	44
Figura 7.2: Análise cinemática para Cunha slope dip 50 e Direction 70 talude oeste - Autor (2022)	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.3.1.1: Lista dos principais recursos minerais utilizados como matéria prima nas indústrias produtoras de materiais refratários. (LSemler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).....	13
Tabela 3.1.3: Principais ocorrências Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais. de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais.....	15
Tabela 3.2.1: Síntese dos principais grupos de argilominerais e suas características diagnósticas principais. Fonte: Deer et al. 2013.....	16
Tabela 3.2.2: Principais tipos de argilas com base na classificação de mercado. Conforme suas propriedades, cada tipo de argila possui uma aplicação principal. Fonte: USGS (2018).	17
Tabela 4.1.1: Classificação do espaçamento de acordo com a distância medida entre as descontinuidades. Traduzido de ISRM (1978)	24
Tabela 4.2.1: Classificação da persistência. Traduzido de ISRM (1978).....	24
Tabela 4.3.1: Descrição das aberturas. Adaptado de ISRM 2007 APUD WOLPP (2018).	25
Tabela 4.4.1: Classes típicas de rugosidade propostas por ISRM (1978)	25
Tabela 6.2.1.1: Orientações da face do talude – Autor (2022).....	32
Tabela 6.2.1.2: Mergulho das Descontinuidades levantadas – Autor (2022).....	34

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
2.	OBJETIVO E RELEVÂNCIA	12
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1.	RECURSOS MINERAIS REFRAATÁRIOS.....	13
3.2.	ARGILAS REFRAATÁRIAS	16
3.2.1.	Aplicações na indústria de refratários	17
3.2.2.	Ocorrência geológica e origem.....	18
3.2.3.	Argilas cauliníticas (caulim refratário).....	19
3.2.4.	Argilas bauxíticas	20
3.2.5.	Depósitos importantes em Minas Gerais	21
3.2.6.	Aspectos econômicos em Minas Gerais	21
3.2.6.1.	Dados de reservas	21
3.2.6.2.	Dados de produção.....	22
4.	DESCONTINUIDADES	23
4.1.	Espaçamento.....	24
4.2.	Persistência	24
4.3.	Abertura.....	25
4.4.	Rugosidade	25
4.5.	Preenchimento	26
4.6.	Presença de água.....	26
5.	ANÁLISE CINEMÁTICA E DOS MECANISMOS DE RUPTURA.....	26
5.1.	Ruptura Circular	27
5.2.	Ruptura Planar	27
5.3.	Ruptura em Cunha.....	28
5.4.	Ruptura em Tombamento	29
6.	METODOLOGIA.....	29
6.1.	Fase Pré- Campo.....	30
6.2.	Fase de Campo	30
6.2.1.	Levantamento de dados de campo.....	31
6.3.	Fase Pós-Campo	35
6.3.1.	DIPS	35
6.3.2.	Talude Norte	36

SUMÁRIO

6.3.3. Talude Sul.....	38
6.3.4. Talude Leste	39
6.3.5. Talude Oeste	41
7. RECOMENDAÇÕES.....	44
8. CONCLUSÕES	46
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

As Argilas refratárias são de grande importância para a indústria, pois através dela pode-se atingir elevadas temperaturas superiores a 1200 °C (McColm 2013), sem sofrer qualquer tipo de alteração nas suas propriedades físico-químicas. Esses materiais são altamente resistentes à pressão mecânica, atração/repulsão elétrica, dissolução química e mudanças dramáticas de temperatura. Esses materiais são essenciais para a vida moderna porque são usados na linha de produção de muitas indústrias diferentes: vidro, cimento, aço, produção de cerâmica, produtos químicos e petroquímicos, refino de metais, cerâmica tradicional e abrasivos.

A RHI Magnesita é a líder mundial da indústria de refratários, tendo o maior número de unidades e os produtos e serviços mais inovadores e confiáveis. A empresa se destaca por apresentar uma incomparável integração vertical, englobando desde a mineração até a produção, fornecendo assim soluções completas de serviços. (RHI Magnesita 2022)

A RHI Magnesita produz 90.000 toneladas por ano de minerais sílico aluminosos no Brasil. A Mina Funchal é uma de suas unidades produtora de argila refratária e está localizada no município de Itabirito. O acesso dá-se a parti de Belo Horizonte seguindo 40 km pela rodovia 040, dirigindo-se até a Empresa Coca Cola situada no município de Itabirito, utilizada como referência, que a partir daí percorre por estradas vicinais até a área alvo do estudo.

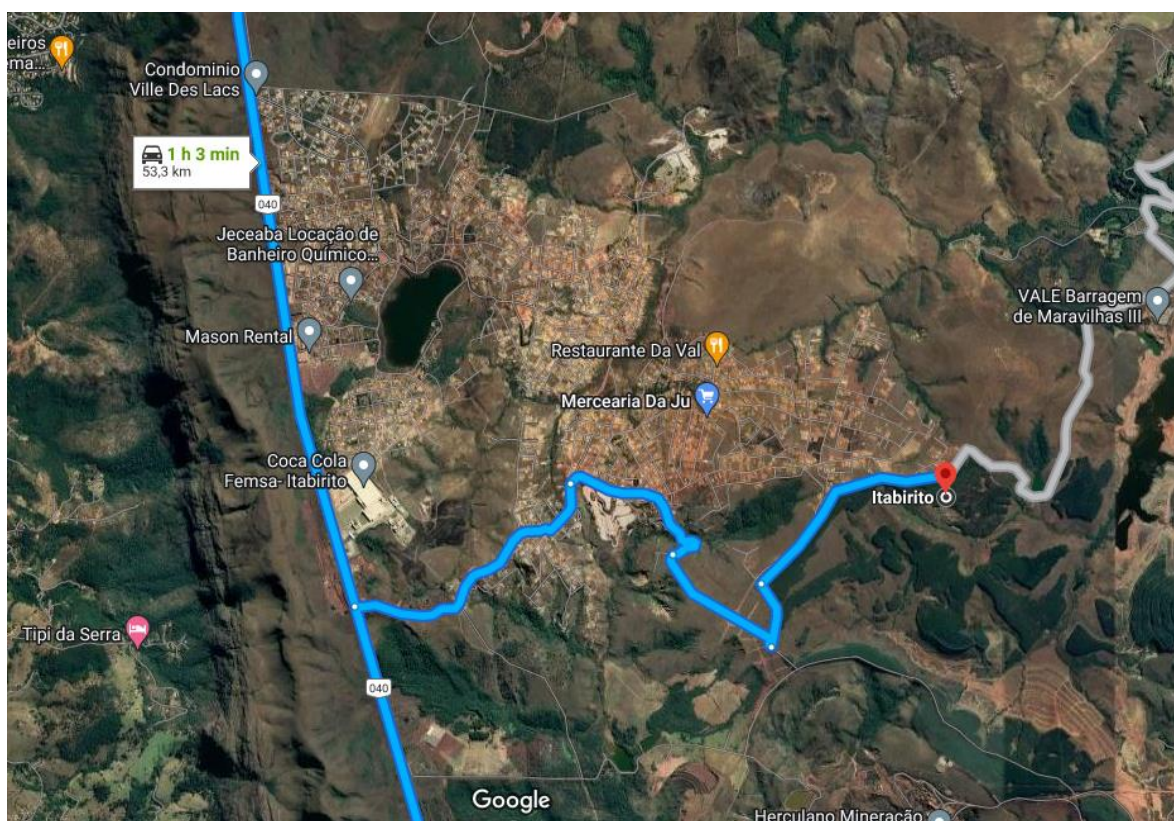


Figura 1.1: Rota para unidade RHI Magnesita. Maxar Technologies (2022)

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das descontinuidades presentes na Cava Funchal na estabilidade dos taludes.

Na mineração (Lavra) são diversas as atividades que podem expor trabalhadores ao risco. A NR 22 busca trazer mais segurança ao setor e conforme descrito no item 22.1.1 temos:

“(...) disciplinar os preceitos a serem observados na organização e no ambiente de trabalho, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento da atividade mineira com a busca permanente da segurança e saúde dos trabalhadores.”

No entanto a NR-22 não tem procedimentos técnicos que subsidiem os trabalhos de campo, sendo esses trabalhos baseados em *Guidelines* Internacionais tais como *Read and Stacey 2009*, onde fatores técnicos e procedimentos operacionais podem ser “guiados” buscando estabilidades de estruturas geotécnicas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RECURSOS MINERAIS REFRAATÁRIOS

Historicamente, os primeiros materiais refratários eram feitos de fragmentos de rochas como argila refratária, areia de quartzo e quartzito, filito e xisto de alumínio, todos com alto ponto de fusão, abundantes na natureza e fáceis de extrair. Com o avanço da tecnologia e do conhecimento científico, diversos outros minerais e rochas foram sendo utilizados, tais como: Agalmatolito (pirofilita), bauxita, dolomita, cianita e seus polimorfos (andalusita e sillimanita, cromita, grafita, magnesita e zircão. (Semler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

Segundo Victoria (2018). Inicialmente, os recursos minerais refratários eram utilizados em sua forma bruta (in-natura) e apenas submetidos a alguns processos de tratamento simples como britagem, lavagem, catação (ou outros métodos de separação mineral) e peneiramento. No entanto, a necessidade de obter refratários mais puros e de maior qualidade tem aumentado ao longo do tempo. Como resultado, as matérias-primas naturais passaram a sofrer processamentos mais rigorosos (como calcinação, sinterização e eletrofusão) visando à produção de compostos sintéticos de alta pureza. Além de compostos artificiais com estruturas e composições cristalinas semelhantes, exemplos de materiais sintéticos desse tipo são sílica fundida, chamote, o chamote, a mulita sinterizada, a alumina calcinada, a alumina eletrofundida, a magnésia calcinada e sinterizada, a doloma. Como um composto sintético de espinélio e cordierita (Semler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

Tabela 3.1.1: Lista dos principais recursos minerais utilizados como matéria prima nas indústrias produtoras de materiais refratários. (LSemler 2006, Krause 2014, ABCERAM 2018).

Recurso Mineral	Tipo de material que produz
Agalmatolito (Pirofilita)	Refratários sílicos-aluminosos
Argilas refratárias	Refratários sílicos-aluminosos
Bauxita	Refratários de alta alumina
Cianita e Minerais Polimorfos	Refratários de alta alumina
Dolomita	Refratários de doloma
Grafita	Refratários básicos de carbono
Magnesita	Refratários de magnésia
Quatzo	Refratários sílicosos
Zircão	Refratários básicos de zircônia

Nos tópicos a seguir, são descritas as principais características dos recursos listados na Tabela 3.3.1.1 e sua potencial ocorrência em Minas Gerais. A Figura 3.3.1.1 e a Tabela 3.1.3 mostram as principais ocorrências de argilas e minerais refratários em Minas Gerais. Vale ressaltar que alguns desses recursos são abordados em capítulos separados do livro, onde podem ser encontradas mais informações sobre os recursos analisados.

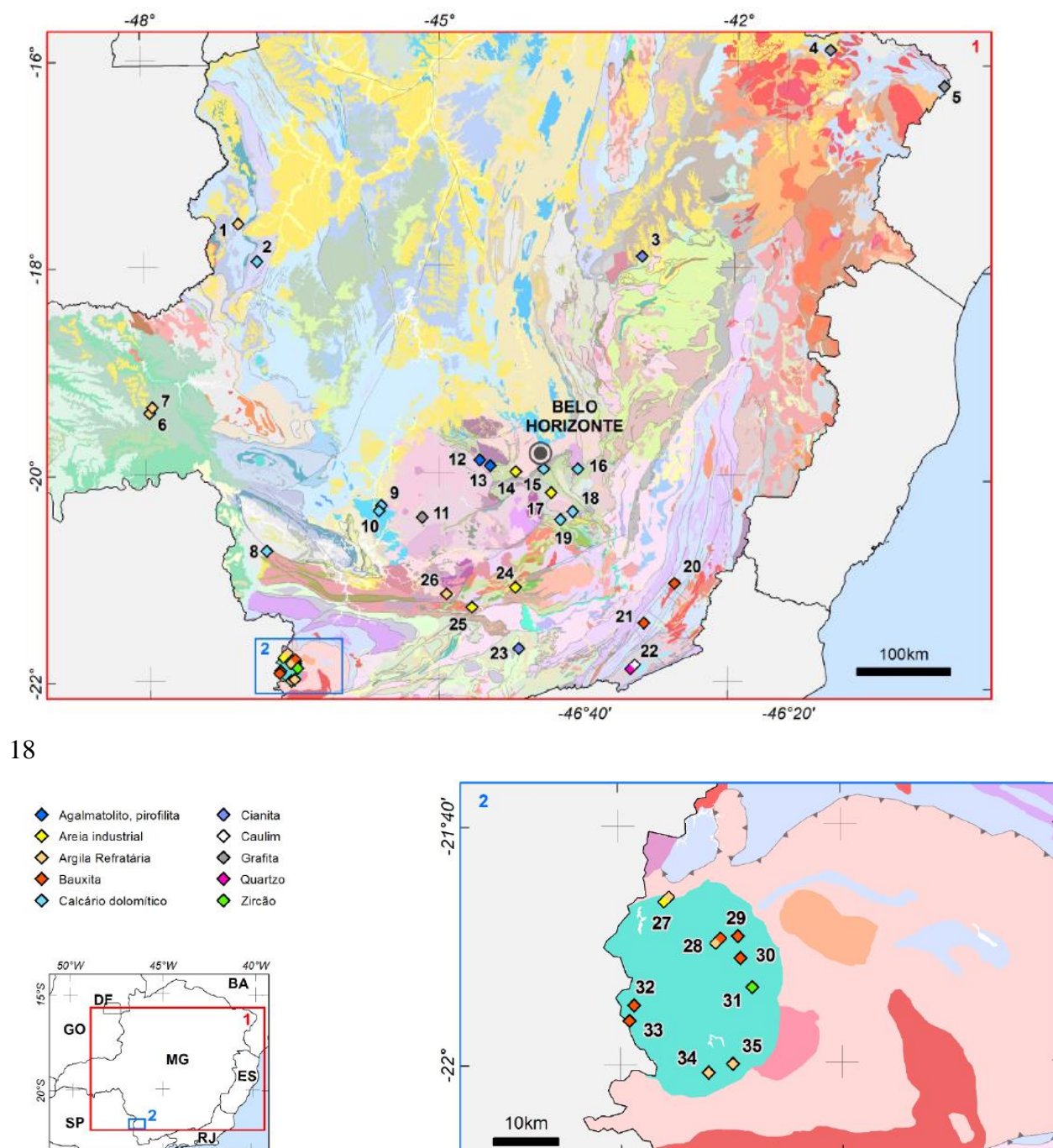


Figura 3.1.1: Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais. A numeração se refere aos itens da Tabela 3.1.3. Mapa geológico modificado de Pinto & Silva 2014.

Tabela 3.1.2: Principais ocorrências Principais ocorrências de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais. de argilas e minerais refratários no estado de Minas Gerais.

	SUBSTÂNCIA	STATUS ECONÔMICO	SITUAÇÃO	TOPONÍMIA	MUNICÍPIO	Latitude	Longitude
1	Argila Refratária	Mina	Ativa	Córrego Pedro Pereira	Guarda-Mor	-17,590646	-47,031222
2	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Serra do Poço Verde - Sucuri	Vazante	-17,954863	-46,844816
3	Cianita		Paralisada	Distrito sede de Itamarandiba	Itamarandiba	-17,900903	-42,938404
4	Grafita	Mina	Ativa	Mina Pedra Azul	Pedra Azul	-15,880005	-41,07216
5	Grafita	Mina	Ativa	Mina Zé Crioulo	Salto da Divisa	-16,206853	-39,922361
6	Argila Refratária	Mina	Ativa	Fazenda Caraço Paraíso	Uberaba	-19,411062	-47,956043
7	Argila Refratária	Mina	Ativa	Fazenda Tijuco	Uberaba	-19,357047	-47,928524
8	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Mina Taboca	Itaú de Minas	-20,758231	-46,771768
9	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Mina Bucaininha	Arcos	-20,322995	-45,59215
10	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Fazenda Corumbá	Arcos	-20,374922	-45,615467
11	Grafita	Mina	Ativa	Distrito sede de Itapecerica	Itapecerica	-20,437575	-45,17142
12	Agalmatolito, pirofilita	Mina	Ativa	Fazenda dos Gomes	Pará de Minas	-19,882782	-44,581077
13	Agalmatolito, pirofilita	Mina	Ativa	Mineração Mateus Leme	Mateus Leme	-19,937603	-44,471865
14	Areia industrial	Mina	Ativa	Rio Betim, região de Vargem do Olaria	Betim	-19,993501	-44,212764
15	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Acaba Mundo (Mannesmann)	Belo Horizonte	-19,965991	-43,925966
16	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Socorro	Barão de Cocais	-19,965418	-43,575412
17	Areia	Mina	Ativa	Distrito sede de Itabirito	Itabirito	-20,196446	-43,846799
18	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Bairro Funil	Ouro Preto	-20,378683	-43,62521
19	Calcário dolomítico	Mina	Ativa	Rodeio de Baixo (CSN)	Ouro Preto	-20,456462	-43,748914
20	Bauxita	Mina	Ativa	Fazenda Chorona	Miraf	-21,059316	-42,567749
21	Bauxita	Mina	Ativa	Distrito sede de Itamarati de Minas	Itamarati de Minas	-21,447754	-42,87919
22	Quartzo, Caulim	Mina	Ativa	Fazenda Santa Maria	Mar de Espanha	-21,876424	-42,991996
23	Cianita		Paralisada	Fazenda Capitão Anastácio	Andrelândia	-21,705861	-44,172659
24	Areia industrial	Mina	Ativa	Distrito sede de São João del Rei	São João del Rei	-21,115133	-44,209461
25	Areia industrial	Mina	Ativa	Distrito sede de Itutinga	Itutinga	-21,306782	-44,658691
26	Argila Refratária	Mina	Ativa	Distrito sede de Ijaci	Ijaci	-21,179281	-44,921951
27	Argila Refratária, Areia	Mina	Ativa	Distrito sede de Poços de Caldas	Poços de Caldas	-21,771376	-46,595615
28	Bauxita, Argila refratária	Mina	Ativa	Morro das Arvores	Poços de Caldas	-21,82961	-46,518488
29	Bauxita	Mina	Ativa	Campo do Meio	Poços de Caldas	-21,823169	-46,488193
30	Bauxita	Mina	Ativa	Cabeça de Boi	Poços de Caldas	-21,854126	-46,484229
31	Zircão		Reavaliação de Reserva	Cercado	Caldas	-21,895149	-46,467117
32	Bauxita	Mina	Ativa	Divisa MG-SP, Mineração Caldense	Poços de Caldas	-21,919057	-46,644697
33	Bauxita	Mina	Ativa	Divisa MG-SP, Mineração Caldense	Poços de Caldas	-21,940467	-46,651979
34	Argila Refratária	Mina	Ativa	Distrito sede de Andradas	Andradas	-22,013238	-46,533944
35	Argila Refratária	Mina	Ativa	SW de Minas Gerais	Andradas	-22,002136	-46,497318

3.2. ARGILAS REFRATÁRIAS

Argila é um termo genérico usado para definir qualquer material natural com textura terrosa, granulometria fina (inferior a 0,004 mm), constituído principalmente por minerais argilosos, que também podem conter diferentes tipos de impurezas, como outros minerais (por exemplo, quartzo, muscovita, biotita, hematita, pirita, etc.) ou matéria orgânica. (ABCERAM 2018).

De um modo geral, em termos de composição química, os argilominerais são silicato de alumínio ou silicato de magnésio hidratado, que pode conter vários outros elementos como ferro, potássio, sódio, cálcio, lítio, etc. Mineralogicamente, pertencem ao subgrupo dos filossilicatos, que são minerais que ocorrem na forma planar, em folhas, empilhadas umas sobre as outras, como as folhas de um livro. Apenas algumas espécies raras de minerais argilosos são exceções. Dependendo de diferenças, como a forma como os argilominerais estão organizados em flocos, eles podem conter diferentes tipos de elementos químicos ou moléculas de água entre as camadas, dando às argilas diferentes tipos de propriedades. (DHZ – Deer et al. 2013).

Dependendo do tipo de arranjo e composição do cristal, dezenas de diferentes espécies de argilominerais podem ser encontradas em depósitos de argila. Neste caso, de acordo com suas propriedades, eles foram divididos em grupos comuns, nos quais se destacaram membros dos grupos caulinita, as esmectitas e as ilitas

Tabela 3.2.1: Síntese dos principais grupos de argilominerais e suas características diagnósticas principais. Fonte: Deer *et al.* 2013.

Grupo	Características
Caulinita	Fórmula Geral: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	Espécies minerais: Caulinita; Haloisita; Dickita; Nacrita
	Íon principal na camada interlamelar: Inexistente
	Água na camada interlamelar: somente na espécie haloisita
	Origem: decomposição de rochas ácidas, ricas em feldspato; ação hidrotermal
Esmectita	Fórmula Geral: $(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Espécies minerais: Montmorilonita; Nontronita; Beidelita; Saponita
	Íon principal na camada interlamelar: Ca e Na
	Água na camada interlamelar: alta
	Origem: decomposição de rochas básicas; deposição de material vulcânico
Ilita	Fórmula Geral: $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
	Espécies minerais: Ilita; Fengita; Brammalita; Glauconita; Celadonita
	Íon principal na camada interlamelar: K
	Água na camada interlamelar: baixa
	Origem: reações diagenéticas ou de baixo grau metamórfico. A existência de diversos tipos de argilominerais implica em tipos

A presença de diferentes tipos de argilominerais significa diferentes tipos de argilas, que por sua vez podem ser encontradas em diferentes ambientes e possuem

diferentes propriedades industriais. Com base nas propriedades e aplicações do produto acabado, os mercados nacional e internacional classificam as argilas em seis tipos principais (DNPM 2011, Dalla Costa *et al.* 2017, USGS 2018): (i) argilas comuns; (ii) argilas plásticas; (iii) argila refratária, (iv) bentonita, (v) caulim, (Tabela 3.2.2).

Tabela 3.2.2: Principais tipos de argilas com base na classificação de mercado. Conforme suas propriedades, cada tipo de argila possui uma aplicação principal. Fonte: USGS (2018).

Tipo	Uso principal
Argilas comuns (<i>Brick clays</i>)	Cerâmicas de alvenaria (tijolos, telhas, lajes, etc.)
Argilas plásticas (<i>Ball clays</i>)	Louças sanitárias e de mesa; cerâmicas de revestimento
Argilas refratárias (<i>Fire clays</i>)	Tijolos refratários, fornos e demais equipamentos industriais
Bentonita	Perfuração de poços, fundição e pelotização
Caulim (<i>China clays</i>)	Papel e cerâmicas sanitárias e de mesa

De acordo com o Dicionário de Ciência e Engenharia Cerâmica (McColm 2013), as argilas refratárias são geralmente definidas como aquelas com alto ponto de fusão (acima de 600 °C) e, portanto, podem ser usadas para fazer vários tipos de cerâmica. Material industrial com alta resistência ao calor.

As propriedades refratárias dessas argilas estão intimamente relacionadas ao tipo de argilominerais presentes, teor de impurezas e teor de alumina (Al_2O_3). Portanto, quanto maior o conteúdo mineral do grupo de minerais caulinita (principalmente composto de sílica - SiO_2 e alumina; (Tabela 3.2.2), maior a pureza (nenhum outro mineral ou orgânico está presente), maior o ponto de fusão e maior a temperatura.

3.2.1. Aplicações na indústria de refratários

Os primeiros materiais produzidos a partir do barro datam de 4.000 anos antes da Idade Comum e foram usados em sua forma original para fazer cerâmicas usadas em fornos. Ainda hoje, esses materiais são usados para esse fim, como se vê, por exemplo, em fornos rústicos usados para produzir carvão em regiões de eucalipto. (Victoria 2018).

Ao longo do tempo, a tecnologia industrial melhorou e até passou a utilizar outros recursos naturais ou sintéticos para produzir materiais mais fortes (Harvey et al. 2006). No entanto, as argilas refratárias ainda são amplamente utilizadas na indústria como matéria-prima para a fabricação de refratários de sílico-aluminosos ($SiO_2-Al_2O_3$), como revestimentos para determinados tipos de fornos industriais. Além disso, essas argilas são amplamente utilizadas na produção de tijolos isolantes para lareiras, churrasqueiras e fornos domésticos, bem como na fabricação de certos tipos de cerâmicas e revestimentos cerâmicos, além de vidros e argamassas especiais (cimentos refratários). Nesse caso, os tijolos refratários convencionais produzidos com essas argilas podem suportar temperaturas de cerca de 1.250 a 1.500°C, necessitando de matérias-primas com valores

entre 20 e 45% Al_2O_3 , Fe_2O_3 abaixo de 2,5% e teor alcalino ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) abaixo de 3% (Krause 2014).



Figura 3.2.1.1: Forno de argila refratária para produção de carvão vegetal. Foto: A Lavoura

Além de serem utilizadas diretamente na produção de refratários sílico-aluminosos, essas argilas também podem ser utilizadas na fabricação de chamote, matéria-prima sintética rica em alumina (entre 50 e 75% Al_2O_3) obtida pelo processo de calcinação. O chamote é mais puro, tem maior teor de alumínio e tem ponto de fusão acima de 1500°C , e é frequentemente usado como um dos componentes de qualidade na produção de refratários de alto alumínio, que são um tipo de qualidade superior capaz de suportar até 1800°C Temperatura $^\circ\text{C}$ (Krause 2014).

3.2.2. Ocorrência geológica e origem

Em termos de origem, as argilas são geralmente classificadas como primárias ou secundárias. No primeiro caso, os argilominerais presentes provêm diretamente da alteração do intemperismo dos afloramentos rochosos e são depositados onde foram

formados (*in situ*), formando argilas residuais. As argilas secundárias, por sua vez, são produzidas a partir de minerais argilosos transportados pela água ou pelo vento e se acumulam em sedimentos distantes da fonte. (Victoria 2018). Este grupo também inclui minerais argilosos (especialmente caulinita) formados por reações químicas que podem ter ocorrido no início da deposição (minerais autigênicos, Murray 2000).

3.2.3. Argilas caulíníticas (caulim refratário)

A argila refratária de caulinita é um tipo especial de caulim, que se refere a um grupo de argilas composto principalmente de minerais argilosos da família da caulinita, que são de cor branca ou quase branca. (Murray 2000). Incluem vários tipos com diferentes composições, que podem ser primárias (residuais) ou secundárias (sedimentares), sendo esta última a mais comum. Isso ocorre porque os agentes de transporte (vento e água) atuam como filtros naturais e tendem a selecionar mais depósitos em termos de tamanho e forma. Portanto, em geral, os depósitos secundários de argila caulinitas tendem a ser mais puros. (Victoria 2018)



Figura 3.2.3.1: Exemplos de argilas caulíníticas – Santa Maria de Itabira/MG Fotos: MF Rural

Os depósitos de caulim refratários mais tradicionais ocorrem na Pensilvânia e Missouri (EUA) e em países como França, Alemanha e Reino Unido, todos formados

no período Carbonífero e representados por camadas lenticulares ou em forma de placa de material argiloso que se encontram abaixo das camadas • Carvão (Harvey *et al.*, 2006). O termo comercial fireclay geralmente se refere a argilas derivadas desses tipos de depósitos, às vezes também chamadas de underclays. Outra conhecida argila refratária encontrada neste tipo de depósito são as argilas siliciosas (flint clays), que se diferenciam de outras argilas por serem densas, rígidas (não plásticas) e apresentarem textura grumosa, fraturas conchoidal e maiores concentrações de óxidos de quartzo e ferro (BGS 2006, McColm 2013).

3.2.4. Argilas bauxíticas

A Argila bauxita apresentada da (Figura 3.2.4.1) é um recurso mineral solto associado à bauxita maciça, uma rocha secundária formada pela alteração da superfície de rochas ricas em alumínio (Victoria 2018). De um modo geral, esse processo se deve à ação contínua das águas superficiais, ou seja, infiltrações no solo, lixiviando substâncias químicas da rocha original, removendo as substâncias químicas mais móveis, como (K_2O , Na_2O e SiO_2), enriquecendo o restante para componentes menos móveis, como alumina (Al_2O_3).



Figura 3.2.4.1: Argila Bauxítica, recurso mineral refratário Foto: Tecnologia é (Acesso em 24/06/2022).

Esses depósitos são mais comumente encontrados em regiões tropicais, onde a precipitação é alta. Eles tendem a se concentrar em terrenos planos e podem ser rastreados até o Cenozóico, com a maioria dos depósitos do mundo formados nos

períodos Neógeno e Quaternário. Além de ser um produto direto do intemperismo e decomposição de rochas com alto teor de alumina, as argilas bauxita também pode ser formadas a partir da decomposição de bauxita maciça, seja como solos residuais ou como sedimentos transportados em camadas coluviais ou aluviais (Hill & Sehnke 2006).

3.2.5. Depósitos importantes em Minas Gerais

Como característica geral das argilas, o aparecimento de sedimentos é frequente e em Minas Gerais eles são disseminados. De acordo com as últimas publicações oficiais sobre as reservas desse recurso no estado de Minas Gerais (Anuário Mineral Brasileiro – 2010; DNPM 2011), foram encontrados depósitos próximos às seguintes cidades do estado: Andradas, Araújo, Betim, Bom Despacho, Caldas, Conceição do Pará, Esmeraldas, Florestal, Francisco Dumont, Guarda-Mor, Ijaci, Indianópolis, Inhaúma, Itabirito, Itaúna, João Pinheiro, Nova Lima, Nova Ponte, Nova Resende, Paracatu, Perdizes, Poços de Caldas, Sacramento, Santo Antônio do Monte, Uberaba e Uberlândia. Dentre esses, destacam-se os depósitos de argilas caulínicas do Triângulo Mineiro e as argilas bauxíticas de Poços de Caldas, ambos tradicionalmente explorados por diversas empresas mineradoras ao longo dos últimos anos.

3.2.6. Aspectos econômicos em Minas Gerais

3.2.6.1. Dados de reservas

De acordo com o Anuário Mineral de Minas Gerais - 2010 a 2014 (Dalla Costa *et al.*, 2017), as reservas medidas de argilas refratárias em Minas Gerais aumentaram significativamente nesse período, de cerca de 180 milhões de toneladas em 2010 para cerca de 260 milhões de toneladas em 2014. Ao mesmo tempo, as reservas recuperáveis também cresceram proporcionalmente, de cerca de 100 milhões de toneladas em 2010 para cerca de 190 milhões de toneladas em 2014. Entre 2010 e 2011, essas reservas permaneceram quase constantes (cerca de 100 milhões de toneladas), e aumentaram substancialmente no final de 2012 (cerca de 130 milhões de toneladas) e em 2013 (cerca de 180 milhões de toneladas). Em 2014, o volume de transações.

3.2.6.2. Dados de produção

Em 2014, Minas Gerais registrou 38 minas de argila refratária, todas lavradas a céu aberto. Entre elas, há apenas 1 mina de médio porte (com uma produção total de 100.000 a 1 milhão de toneladas), 6 minas pequenas (10.000 a 100.000 toneladas) e as 31 restantes são microminas com produção inferior a 10.000 toneladas (Dalla Costa et al. Pessoas, 2017). Segundo a mesma fonte, a produção total destas minas em 2014 foi de cerca de 268 mil toneladas, muito inferior ao total do ano anterior (355 mil toneladas em 2013). A produção total de argila refratária no estado também oscilou de 2010 a 2012, atingindo cerca de 284 mil toneladas em 2012, 214 mil toneladas em 2011 e 250 mil toneladas em 2010 (Figura 3.2.6.2.1).

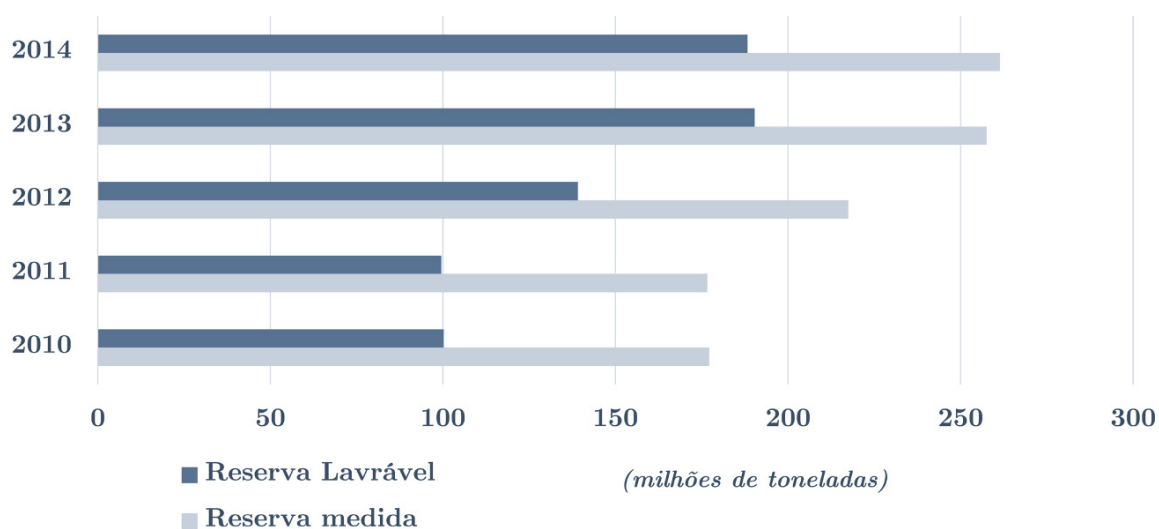


Figura 3.2.6.2.1: Evolução do volume das reservas medidas e lavráveis de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa et al. 2017).

Em relação à quantidade de argila refratária processada pela estação de tratamento, os dados apresentaram considerável variação em relação à produção total e não houve relação proporcional entre as duas (Figura 3.2.6.2.2). De 2010 a 2014, a produção beneficiada por esse recurso oscilou menos que a produção total, embora o valor tenha diminuído de um ano para o outro (por exemplo, de 2010 a 2011), a produção beneficiada registrou aumento de volume, cerca de 73.000 toneladas de material.

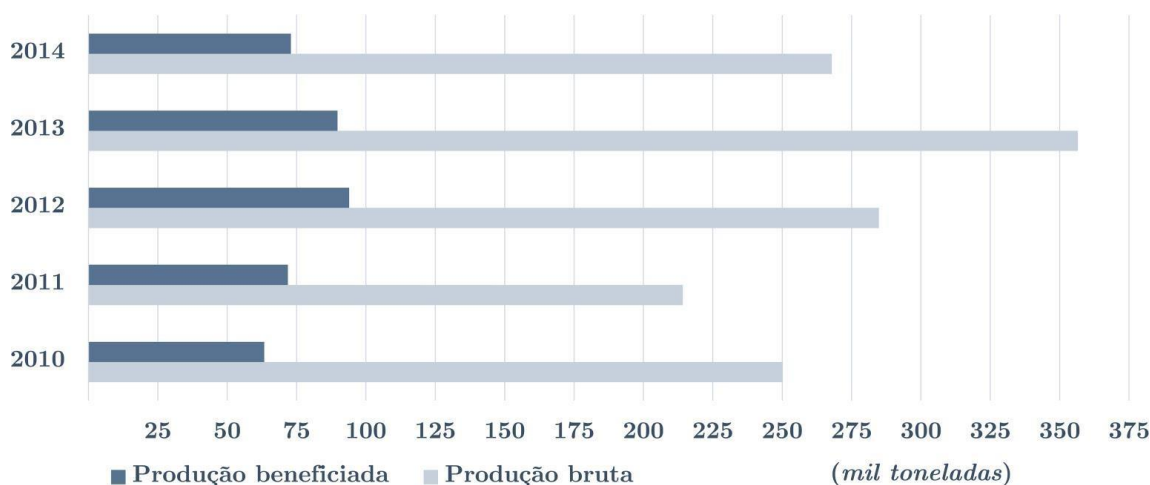


Figura 3.2.6.2.2: Evolução da produção bruta e beneficiada de argilas refratárias em Minas Gerais entre os anos de 2010 e 2014. Fonte: Anuário Mineral Estadual de Minas Gerais (Dalla Costa et al. 2017).

4. DESCONTINUIDADES

Uma descontinuidade é qualquer quebra mecânica ou fratura que existe em um maciço rochoso, é importante determinar sua origem, que pode ser natural ou antrópica devido ao desmonte da rocha pelo explosivo (Fiori & Carmignani 2009).

Segundo Feriane (2021) é fundamental além de entender as características do maciço rochoso, também entendemos as descontinuidades que existem na região. Estas estruturas são as principais razões para a perda de resistência do maciço rochoso fraturado. As descontinuidades são definidas por planos de falhas que interrompem a continuidade física da parcela, podendo ser através de falhas, juntas, fissuras, fraturas, foliações, diques, veios, etc.

De acordo com Fiori & Carmignani (2009), as principais características das descontinuidades que afetam o comportamento geotécnico dos blocos rompidos são a espaçamento, persistência, abertura, rugosidade, preenchimento, presença de água. Muitas vezes, são essas descontinuidades que determinam o comportamento mecânico da parcela, pois são as estruturas menos resistentes, ou seja, no caso de rupturas associadas a deslizamentos verificados ao longo de superfícies anisotrópicas bem definidas.

4.1. Espaçamento

O espaçamento é a distância média entre as descontinuidades que pertencem à mesma família. Este parâmetro afeta diretamente a qualidade ou resistência do maciço rochoso, e mesmo que a rocha seja classificada como resistente, sua estrutura é afetada quando o espaçamento de descontinuidade é pequeno (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Tabela 4.1.1: Classificação do espaçamento de acordo com a distância medida entre as descontinuidades. Traduzido de ISRM (1978).

Descrição	Espaçamento
Extremamente pequeno	< 20 mm
Muito pequeno	20-60 mm
Pequeno	60 - 200 mm
Moderado	200 - 600 mm
Grande	600 - 2000 mm
Muito grande	2000 mm - 6000 mm
Extremamente grande	> 6000 mm

4.2. Persistência

Segundo (FIORI e CARMIGNANI, 2009), a persistência é representada pela extensão de uma descontinuidade medida num plano, é um dos parâmetros que mais influenciam no comportamento mecânico e hidráulico do maciço rochoso. A (Tabela 4.2.1) traz os valores e a descrição correspondente.

Tabela 4.2.1: Classificação da persistência. Traduzido de ISRM (1978).

Termo	Persistência
Persistência muito pequena/baixa	Menor que 1m
Persistência pequena/baixa	de 1 a 3m
Persistência média	de 3 a 10 m
Persistência grande/elevada	de 10 a 20 m
Persistência muito grande/elevada	Maior que 20 m

4.3. Abertura

De acordo com (FIORI e CARMIGNANI, 2009), a abertura é a distância perpendicular entre as paredes da junta, aspecto importante para determinar se há alteração, preenchimento ou escoamento na descontinuidade. A Tabela abaixo apresenta a relação das aberturas e suas descrições.

Tabela 4.3.1: Descrição das aberturas. Adaptado de ISRM 2007 APUD WOLPP (2018).

DESCRIÇÃO	ABERTURA
Muito fechadas	< 0,1 mm
Fechadas	0,1 – 0,25 mm
Parcialmente abertas	0,25 – 0,5 mm
Abertas	0,5 – 2,5 mm
Cavernosas	> 1 m

4.4. Rugosidade

A rugosidades está relacionado as irregularidades e ondulações presentes nas paredes das descontinuidades no qual pode se determinar a resistência de cisalhamento das mesmas (FIORI e CARMIGNANI, 2009). Contudo, quanto menores as aberturas e a espessura do preenchimento das descontinuidades de um maciço rochoso, maior será a importância da característica da rugosidade em relação á resistência de cisalhamento. (Nadalin, 2018).

Tabela 4.4.1: Classes típicas de rugosidade propostas por ISRM (1978).

Classes	Descrição	
	Escala grande	Escala intermediária
I	Rugosa	Irregular
II	Lisa	
III	Estriada	
IV	Rugosa	Ondulada
V	Lisa	
VI	Estriada	
VII	Rugosa	Planar
VIII	Lisa	
IX	Estriada	

4.5. Preenchimento

O material que está inserido entre as paredes das descontinuidades é definido como preenchimento, podendo ser silte, areia, dentre outros. Assim como na rugosidade esse fator também pode influenciar na resistência de cisalhamento, pois normalmente o material do preenchimento tem uma resistência de cisalhamento menor do que a rocha (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Determinadas estruturas há preenchimento parcial e total da abertura, o que depende da distância dentre as paredes adjacentes (ISRM 1978).



Figura 4.5.1: Exemplo de abertura e preenchimento de descontinuidades. Modificado de ISRM (1978).

4.6. Presença de água

Segundo (FIORI e CARMIGNANI, 2009) a presença de água reduz a resistência de cisalhamento do maciço rochoso, atuando como um possível lubrificante entre as juntas. Contudo, a presença de água nos indica a possibilidade de um fluxo ou umidade nas descontinuidades.

5. ANÁLISE CINEMÁTICA E DOS MECANISMOS DE RUPTURA

O Estudo do movimento de corpos sem o compromisso com a causa do movimento refere-se a análise cinemática (Fiori e Carmignani 2015). Sendo assim, esse método de estudo é usualmente utilizado para avaliar deslizamentos em maciços rochosos (Cerri *et al.* 2018).

Muitas vezes, taludes com planos de enfraquecimento muito acentuados estão em condições estáveis porque em muitos casos não estão livres para se mover ao longo das superfícies enfraquecidas que confinam o bloco. No entanto, quando a obstrução ao movimento do bloco for removida por processos erosivos, escavação ou aumento do

plano de fratura, o bloco ficará livre e causará deslizamentos. (FIORI e CARMIGNANI, 2009).

Assim, o movimento gravitacional da massa ocorre por meio de quatro tipos de ruptura: planar, cunha, circular e tombamento. Para determinar que tipo de falha pode ocorrer, deve ser realizada uma análise in loco da posição da descontinuidade em relação à posição do talude com auxílio de uma bússola

5.1. Ruptura Circular

Pode ocorrer em maciços rochosos brandos pouco competentes e em maciços muito alterados ou com elevado grau de fraturamento, apresentando um comportamento isotrópico onde os planos de descontinuidades não controlam o comportamento mecânico, tendo neste caso um comportamento de solo (Paz 2015).

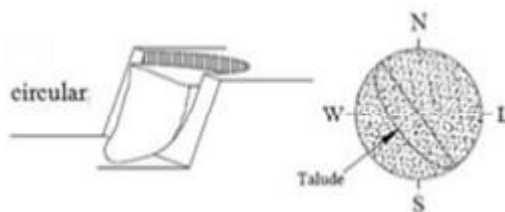


Figura 5.1.1: Mecanismos de ruptura circular e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)

5.2. Ruptura Planar

A falha planar ocorre quando uma série de descontinuidades (possivelmente paralelas ou subparalelas) aparecem em uma superfície inclinada com um ângulo de inclinação maior que o ângulo de atrito plano (Feriane 2021). Segundo Fiori e Carmignani (2009), o deslizamento ocorrerá ao longo do mergulho, variando em até 20°. Esses deslizamentos de terra podem ter dezenas ou centenas de metros cúbicos de tamanho, ou grandes deslizamentos translacionais envolvendo milhares de metros cúbicos.

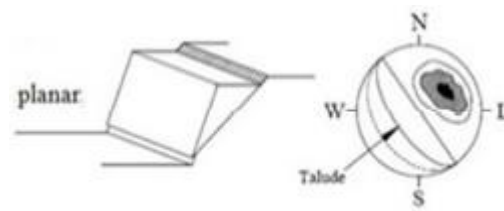


Figura 5.2.1: Mecanismos de ruptura planar e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)

5.3. Ruptura em Cunha

Quando a direção da superfície do talude interceptada por dois planos de descontinuidade muda, a área formada tem a forma de uma cunha (Paz 2015). A linha de interseção dos planos precisa estar na superfície do talude para que essa ruptura ocorra. Se o ângulo no qual duas superfícies se encontram for maior que o ângulo de atrito dos pontos ásperos, a rocha se moverá. Isso é conhecido como ruptura em cunha (Fiori & Carmignani 2009).

A forma e o tamanho da cunha formada são determinados pelo tamanho e forma do maciço rochoso e pelo espaçamento e continuidade das descontinuidades no maciço. Alturas altas podem causar muitos danos quando o bloco se quebra rapidamente. Esse tipo de ruptura acontece muito rapidamente, causando muitos danos.



Figura 5.3.1: Vista rompimento em cunha na Cava Funchal – Autor (2022)

5.4. Ruptura em Tombamento

Fontinhas e Pereira (2012) descreve este tipo de ruptura como ocorrendo quando blocos ou colunas de rocha giram sobre uma base estacionária. As faces do talude devem estar em um ângulo entre 0 e 30 graus de diferença entre elas, e as quebras no material devem ser paralelas ou quase paralelas a esta face do talude. O tombamento de blocos depende da presença de planos estruturais bem definidos, como acamadamento, xistosidade, falhas, juntas e outros. Esta situação pode originar também deslizamentos, se existir uma inclinação progressiva do talude sem existir colapso, o bloco pode se desprender do talude e desloca-se para frente, movimentando-se rapidamente pela face do talude, podendo fraturar-se, rolar ou deslizar. A condição mais favorável para que ocorra o tombamento é quando uma família se inclina no talude e se inclina em um ângulo maior que $(90^\circ - \phi)$, quando se inclina, deve ser menor que o ângulo de atrito. (Fiori & Carmignani 2009).

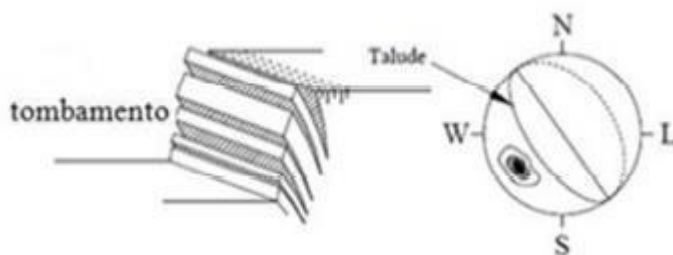


Figura 5.4.1: Mecanismos de ruptura por tombamento e a sua representação estereográfica (Hoek e Bray, 1981)

6. METODOLOGIA

Para este trabalho a metodologia aplicada foi dividida em três fases. Sendo:

- Fase Pré-Campo: Estudo teórico sobre as principais definições e métodos a serem aplicados na análise de estabilidade de taludes rochosos, sendo este já descrito no referencial teórico e, caracterização local básica da área de estudo;
- Fase de Campo: levantamento dos dados e análise da área de estudo;

- Fase Pós-Campo: tratamento e análise dos dados coletados dando subsídio para etapa de resultados e discussões.

6.1. Fase Pré- Campo

Esta fase antecede o trabalho de campo e visa demonstrar a localização da área de estudo, bem como apresentar e compreender a geologia da área.

O Talude A Cava estudada pertence a empresa RHI Magnesita no qual destina a sua extração de Argila refratária como matéria prima para uma determinada linha de tijolos e massas refratárias.

A área alvo dos estudos está situada na zona rural do município de Itabirito, estado de Minas Gerais, e todo material extraído nessa área é enviado para unidade industrial da RHI Magnesita situada na região industrial de Contagem/MG.

6.2. Fase de Campo

Na fase de campo foi possível levantar dados referente as características do maciço rochoso e analisar as descontinuidades e avaliar possíveis rupturas. Para a coleta de dados em campo, foram necessários os seguintes materiais de apoio:

- Bússola
- Martelo de geólogo;
- Caderneta de anotações
- Câmera fotográfica e
- Drone Mavic Mini da DJI

A (Figura 6.2.1) traz a vista superior da Mina de Argila refratária capturada com Drone, onde é possível visualizar toda a extensão da área de estudo de aproximadamente 3.145 m².



Figura 6.2.1: Vista superior da Cava Funchal – Autor (2022)



Figura 6.2.2: Vista frontal Cava Funchal – Autor (2022)

6.2.1. Levantamento de dados de campo

Ao acessar o local é possível perceber uma grande quantidade de água no fundo da cava, não proveniente do lençol freático devido a processo de extração, mas devido

ao grande volume de precipitação pluviométrica que ocorre na região conforme (Figura 6.2.1.1).



Figura 6.2.1.1: Probabilidade histórica mensal de precipitação em Itabirito – (WeatherSpark.com 2022)
acesso em : 06/11/2022

Inicialmente foi realizado um levantamento de Drone para conhecimento de toda a área de estudo, como se tratava de cava foram levantados dados de orientação da face dos taludes, leste, oeste, norte e sul e nível, no qual estavam posicionadas. Os valores abaixo (Tabela 6.2.1.1) correspondem a atitude dos taludes assim como seu nível.

Tabela 6.2.1.1: Orientações da face do talude – Autor (2022).

Face do talude	Atitude	Cota
Talude Leste	251/61	1326
Talude Oeste	98/59	1326
Talude Norte	172/56	1326
Talude Sul	332/61	1326

Após o levantamento da face dos taludes, foi iniciada a fase de análise e medição das discontinuidades presentes no maciço rochoso.

Durante toda a fase de campo foi possível observar que em todos os taludes havia duas ou mais famílias de descontinuidades com indicativo de presença de água., o que possivelmente torna nesses locais uma zona de fraqueza. Sendo assim, foram realizados levantamentos da direção e mergulho dos taludes e das descontinuidades encontradas em campo.

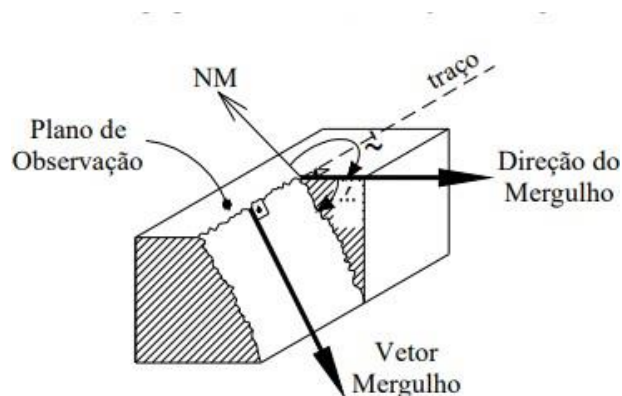


Figura 6.2.1.2: Orientação da descontinuidade. – Maia (2003)

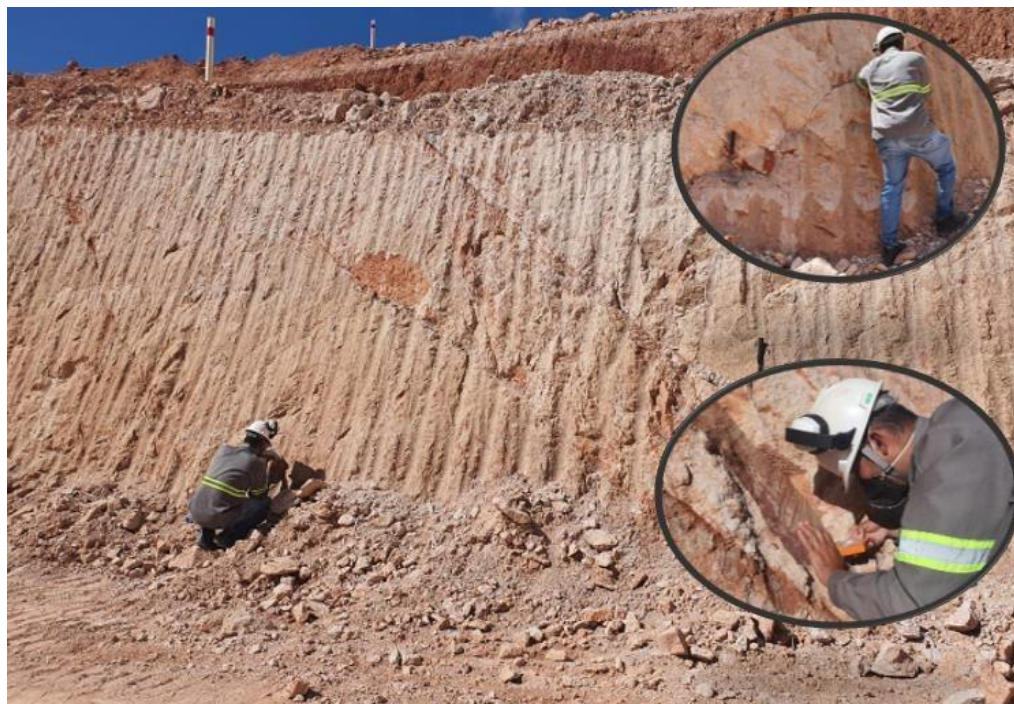
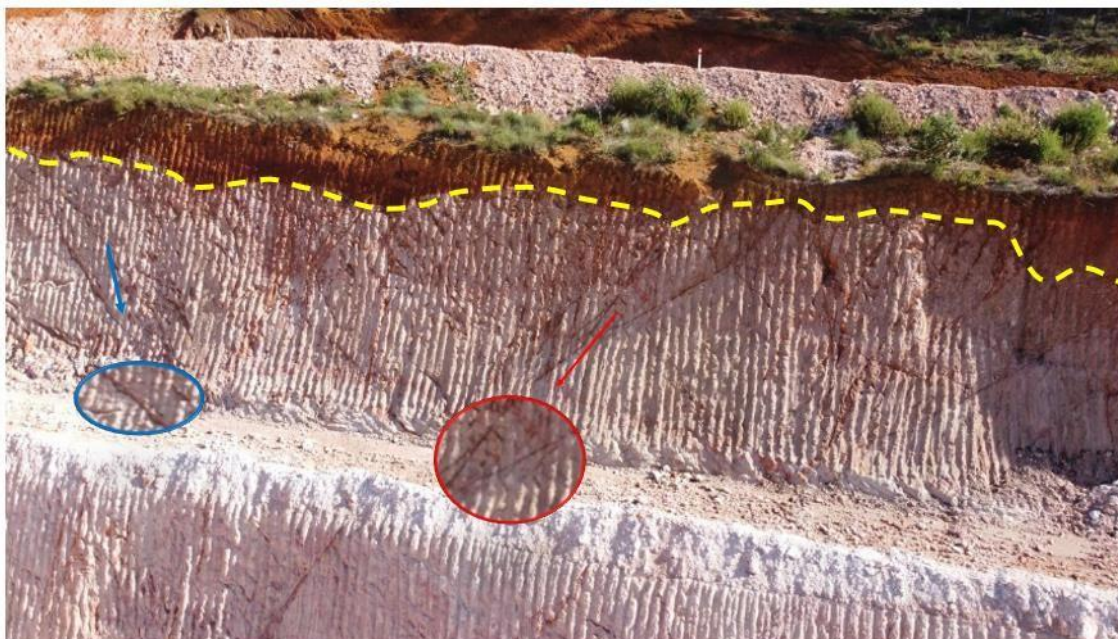


Figura 6.2.1.3: Levantamento do Mergulho das Descontinuidades – Autor (2022)

Tabela 6.2.1.2: Mergulho das Descontinuidades levantadas – Autor (2022).

Talude Sul	Talude Norte	Talude Leste	Talude Oeste
320/51	192/61	265/53	264/56
298/35	143/63	302/46	112/66
304/55	235/33	323/63	182/46
246/30	234/34	279/41	112/36
230/50	212/38	111/84	163/41
254/60	134/56	110/79	91/34
268/30	121/44	92/74	122/44
158/65	121/44	253/41	12/19
112/70	134/43	277/56	46/39
122/66	120/76	219/34	114/47
111/75	22/79	270/41	154/49
282/79	265/53	251/33	109/49
296/84	302/46	291/45	109/42
	323/46	253/41	131/49
		264/24	24/33

A cava está no seu início de operação e no talude norte pode-se observar (Figura 6.2.1.4) a presença de uma camada de aproximadamente 1,5 metros de “topsoil”. A figura também retrata a presença de duas famílias de descontinuidades que foram consideradas no presente estudo.

**Figura 6.2.1.4:** Vista frontal da face do Talude Norte – Autor (2022)

6.3. Fase Pós-Campo

Essa etapa foi realizada após a coleta de dados dos mergulhos e orientações da face dos taludes, levantadas na fase de campo. Em posse desses dados foi realizado análises cinemáticas no *software* DIPS para compreender melhor o comportamento da face do talude em relação os possíveis tipos de rupturas devidos as descontinuidades no talude.

Como, ainda, não foram executados ensaios de laboratório, os parâmetros geotécnicos dos materiais constituintes da cava foram determinados em função da descrição geológica geotécnica desenvolvida durante a fase de campo. Tal mapeamento gerou uma base de dados adequada para a devida classificação geomecânica do maciço. Para tal classificação foi empregado a metodologia de Bieniawski (1989), denominada RMR.

Dessa forma, tais parâmetros foram obtidos via *software* RocData 5.013 da RocScience, que emprega um banco de dados mundial. Assim, empregou-se o critério de ruptura de Hoek-Brown.

Nas análises cinemáticas empregou-se o ângulo de atrito das descontinuidades em conjunção com as mesmas. Assim, pela descrição de campo ter revelado preenchimento arenoso, definiu-se o ângulo de atrito da descontinuidade como sendo igual a 30°.

Contudo, para cada face do talude sendo elas, norte, sul, leste e oeste, foram feitas 3 análises cinemáticas, sendo elas: cunha, planar, tombamento.

6.3.1. DIPS

Segundo tutorial da Rocscience, o Dips é um programa projetado para a análise interativa de dados geológicos baseados em orientação. O programa é um kit de ferramentas capaz de muitas aplicações diferentes e é projetado tanto para o usuário iniciante ou ocasional, quanto para o usuário experiente de projeção estereográfica que deseja utilizar ferramentas mais avançadas na análise de dados geológicos. O Dips permite ao usuário analisar e visualizar dados estruturais seguindo as mesmas técnicas usadas em estereonetes manuais. Além disso, muitos recursos computacionais estão disponíveis, como contorno estatístico de agrupamento de orientação, cálculo de orientação média e análise qualitativa e quantitativa de atributos de recursos. Dips foi

projetado para a análise de características relacionadas à análise de engenharia de estruturas rochosas, no entanto, o formato livre do arquivo de dados Dips permite a análise de quaisquer dados baseados em orientação.

6.3.2. Talude Norte

O Talude Norte apresentou uma probabilidade de aproximadamente 25% para ruptura em cunha (Figura 6.3.2.1) levando em consideração as descontinuidades mapeadas em campo.

Para rupturas planares e tombamento não foram detectadas probabilidades de rupturas (0%) conforme podem ser verificadas na Figura 6.3.2.2 e Figura 6.3.2.3.

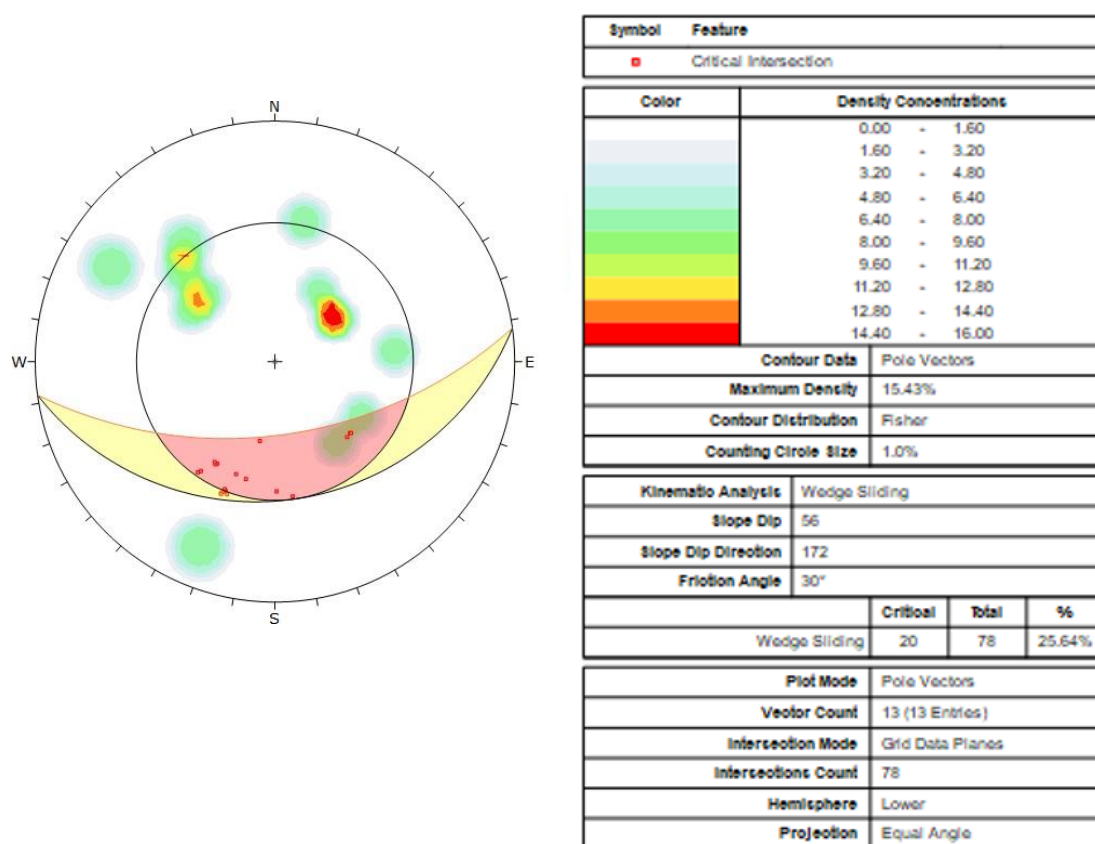
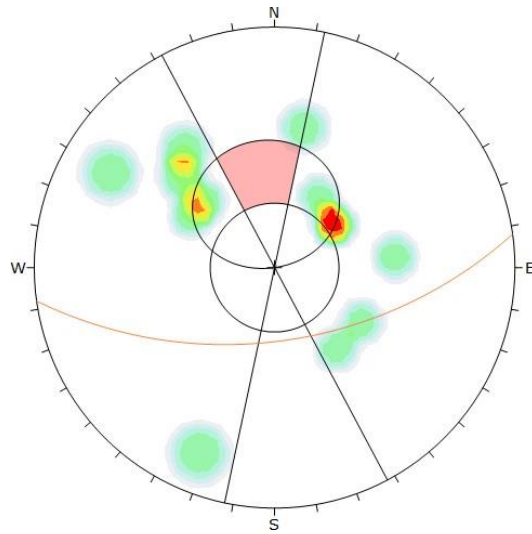
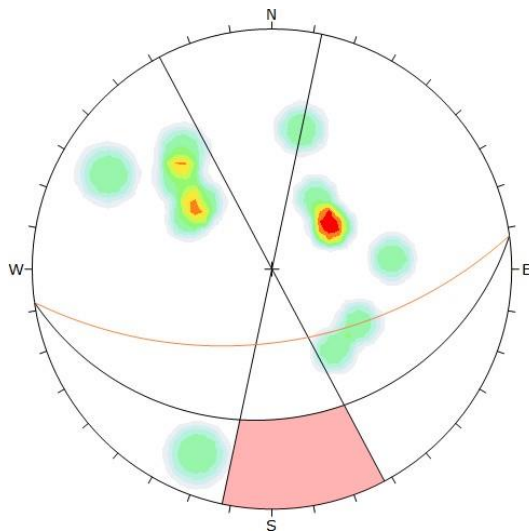


Figura 6.3.2.1: Análise cinemática para cunha talude norte - Autor (2022)



Color	Density Concentrations			
	0.00 - 1.60			
	1.60 - 3.20			
	3.20 - 4.80			
	4.80 - 6.40			
	6.40 - 8.00			
	8.00 - 9.60			
	9.60 - 11.20			
	11.20 - 12.80			
	12.80 - 14.40			
	14.40 - 16.00			
Contour Data		Pole Vectors		
Maximum Density		15.43%		
Contour Distribution		Fisher		
Counting Circle Size		1.0%		
Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip		56		
Slope Dip Direction		172		
Friction Angle		30°		
Lateral Limits		20°		
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		0	13	0.00%
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		13 (13 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

Figura 6.3.2.2: Análise cinemática para planar talude norte - Autor (2022)



Color	Density Concentrations			
	0.00	-	1.60	
	1.60	-	3.20	
	3.20	-	4.80	
	4.80	-	6.40	
	6.40	-	8.00	
	8.00	-	9.60	
	9.60	-	11.20	
	11.20	-	12.80	
	12.80	-	14.40	
	14.40	-	16.00	
Contour Data		Pole Vectors		
Maximum Density		15.43%		
Contour Distribution		Fisher		
Counting Circle Size		1.0%		
Kinematic Analysis		Flexural Toppling		
Slope Dip		56		
Slope Dip Direction		172		
Friction Angle		30°		
Lateral Limits		20°		
		Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)		0	13	0.00%
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		13 (13 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

Figura 6.3.2.3: Análise cinemática para tombamento talude norte - Autor (2022)

6.3.3. Talude Sul

O Talude Sul também apresentou uma baixa probabilidade de ruptura em todas as análises, sendo os valores aproximados iguais a 6%, 0% e 8% para rupturas em cunha, planar e tombamento respectivamente. Os resultados são ilustrados na Figura 6.3.3.1, Figura 6.3.3.2 e Figura 6.3.3.3.

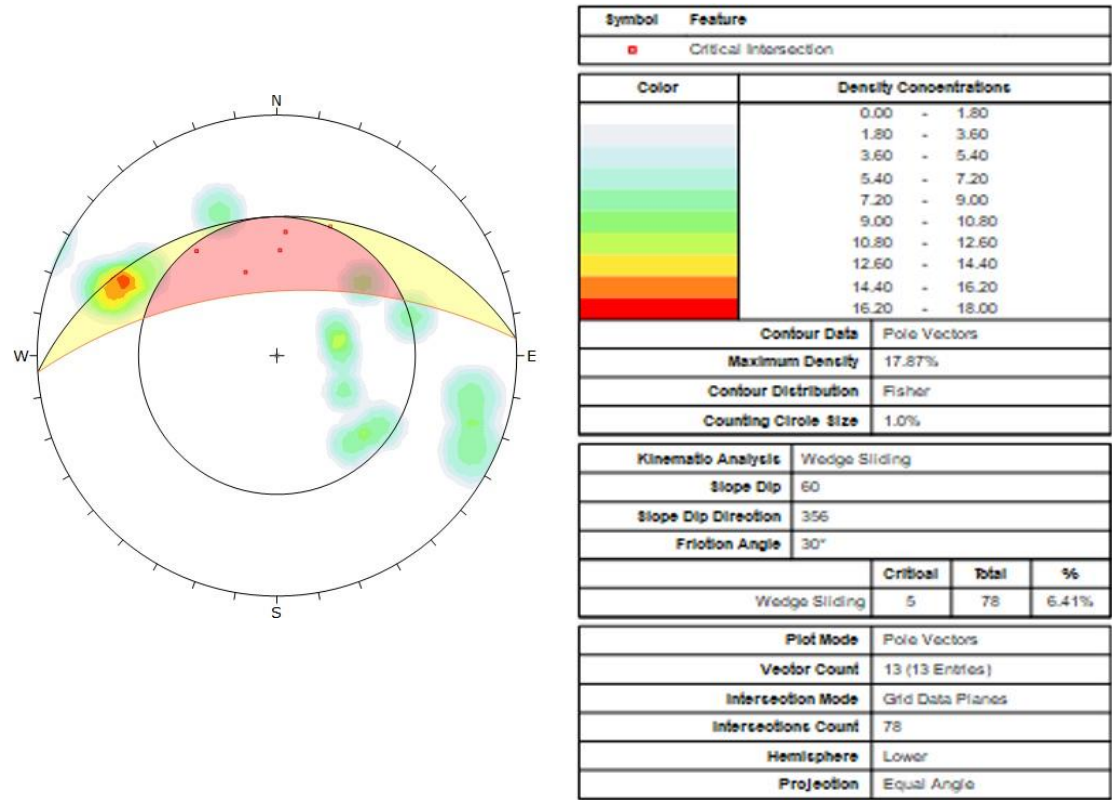


Figura 6.3.3.1: Análise cinemática para cunha talude sul - Autor (2022)

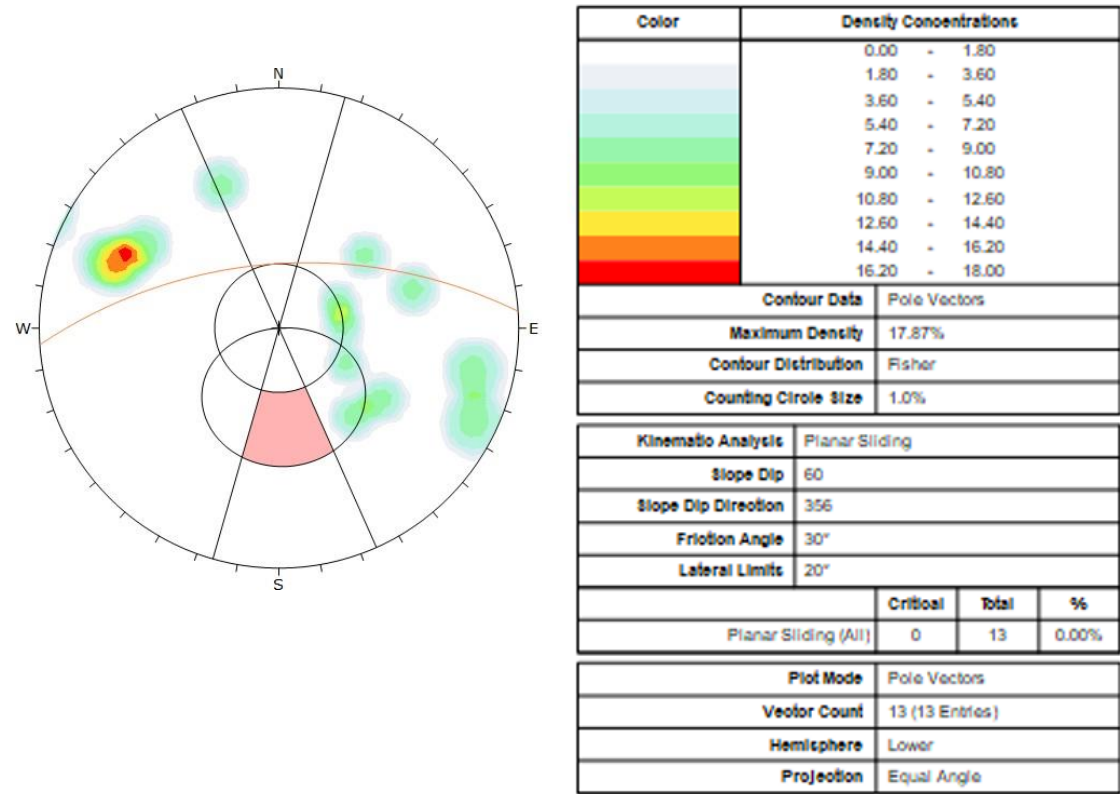


Figura 6.3.3.2: Análise cinemática para planar talude sul - Autor (2022)

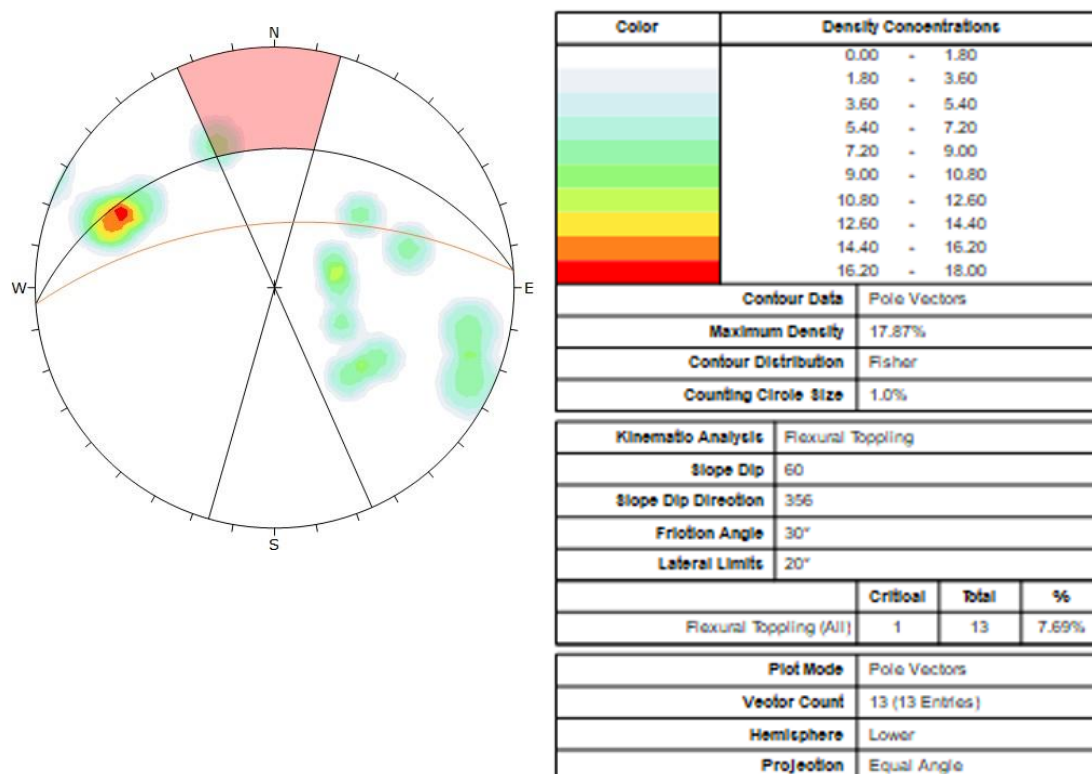


Figura 6.3.3.3: Análise cinemática para tombamento talude sul - Autor (2022)

6.3.4. Talude Leste

O Talude Leste apresentou percentuais elevados para ruptura em Cunha (60%) e ruptura Planar (33%). De acordo com a análise apresentada na Figura 6.3.4.2, os 60% representam um total de 104 interações analisadas sendo 63 delas críticas. Foi possível perceber uma grande quantidade de descontinuidades no talude leste na fase de campo, como representado na Figura 6.3.4.1. A probabilidade de ruptura por tombamento é de 0% conforme pode ser verificado na Figura 6.3.4.4.



Figura 6.3.4.1: Vista frontal talude leste - Autor (2022)

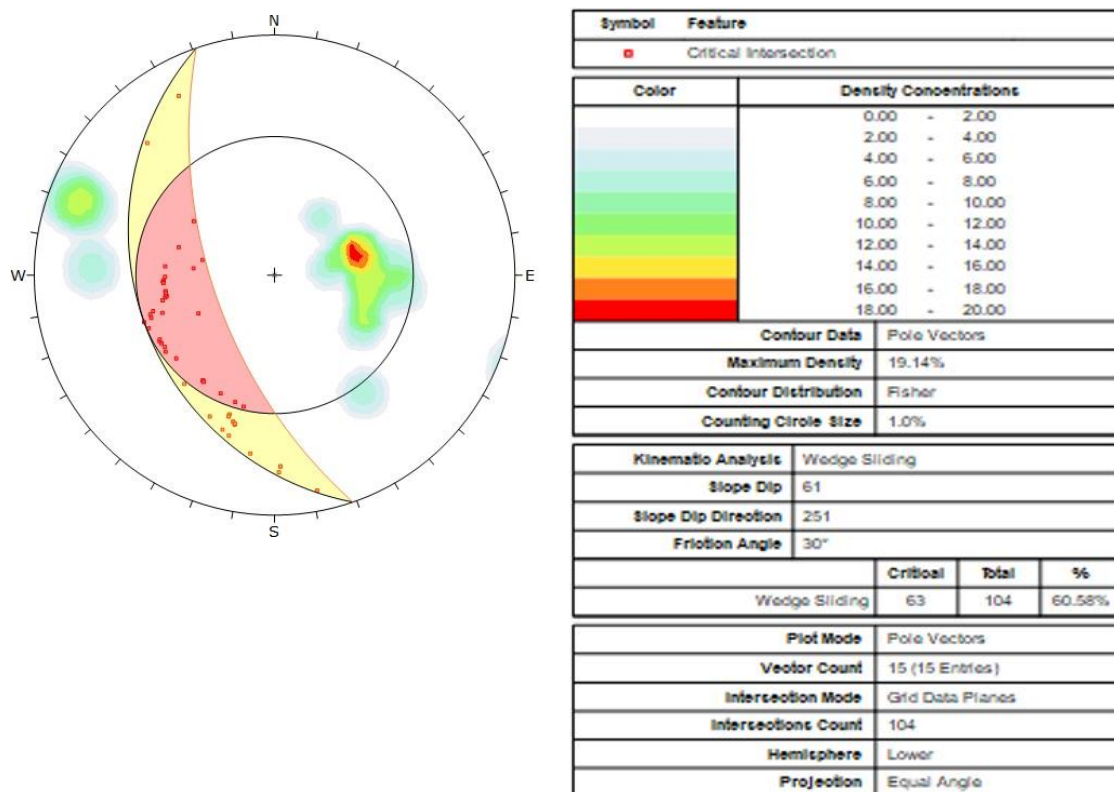


Figura 6.3.4.2: Análise cinemática para cunha talude leste - Autor (2022)

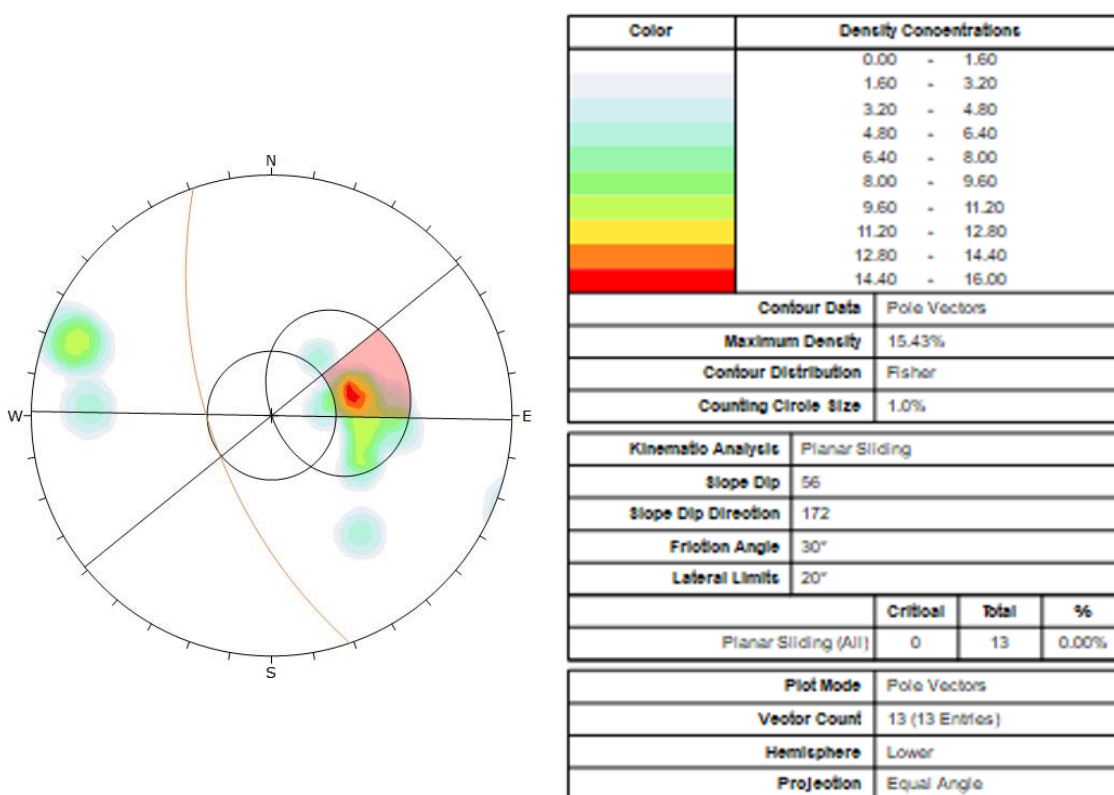


Figura 6.3.4.3: Análise cinemática para planar talude leste - Autor (2022)

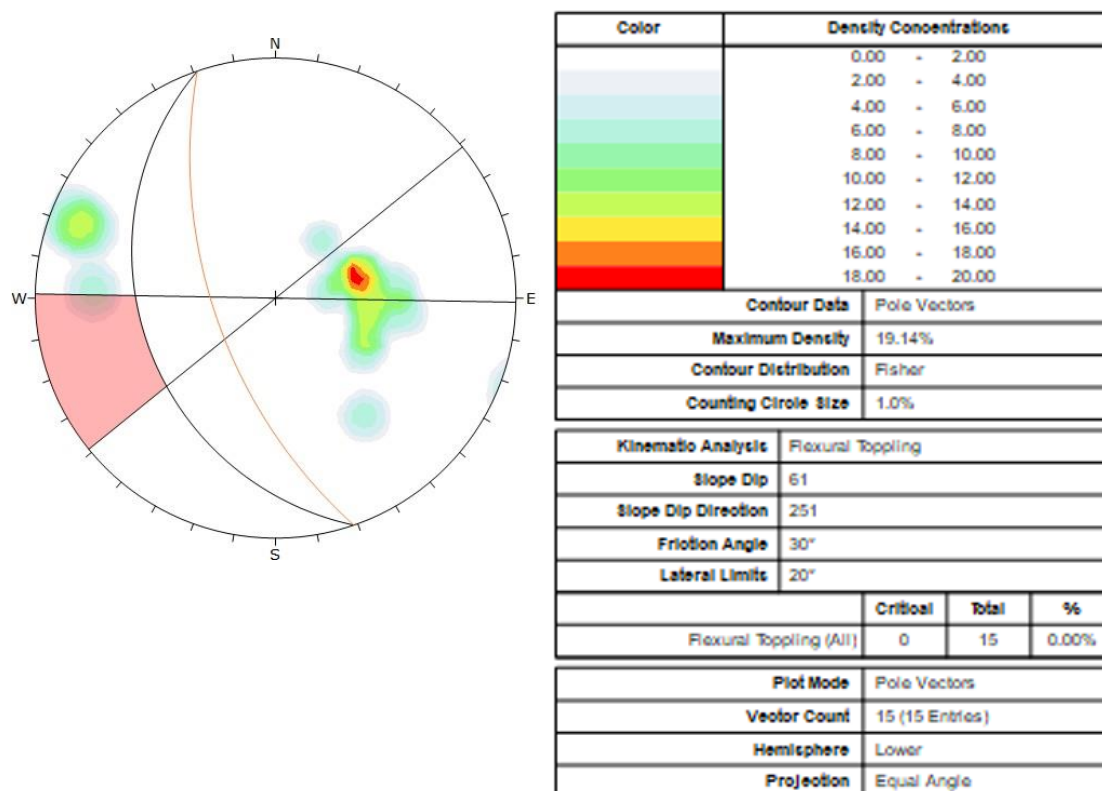


Figura 6.3.4.4: Análise cinemática para tombamento talude leste - Autor (2022)

6.3.5. Talude Oeste

O talude Oeste apresentou na análise cinemática 59% de probabilidade (Figura 6.3.5.2) de ruptura em cunha e 33% de probabilidade de ruptura planar (Figura 6.3.5.3). Não foi identificada probabilidade de ruptura para o modo de falha tombamento (Figura 6.3.5.4). A alta probabilidade de ruptura em cunha no talude Oeste pôde ser constatada no dia do mapeamento, uma vez que foi possível visualizar em campo tal tipo de ruptura, conforme pode ser observado na Figura 6.3.5.1.



Figura 6.3.5.1: Ruptura em cunha talude oeste - Autor (2022)

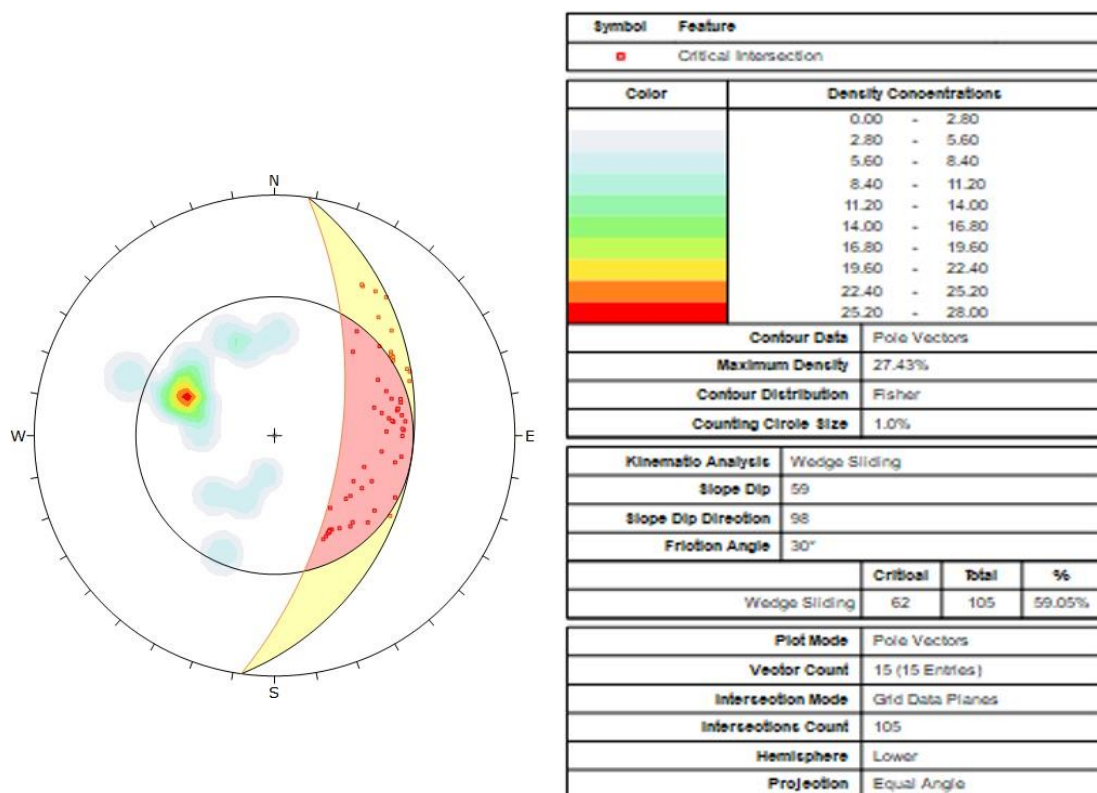


Figura 6.3.5.2: Análise cinemática para cunha talude oeste - Autor (2022)

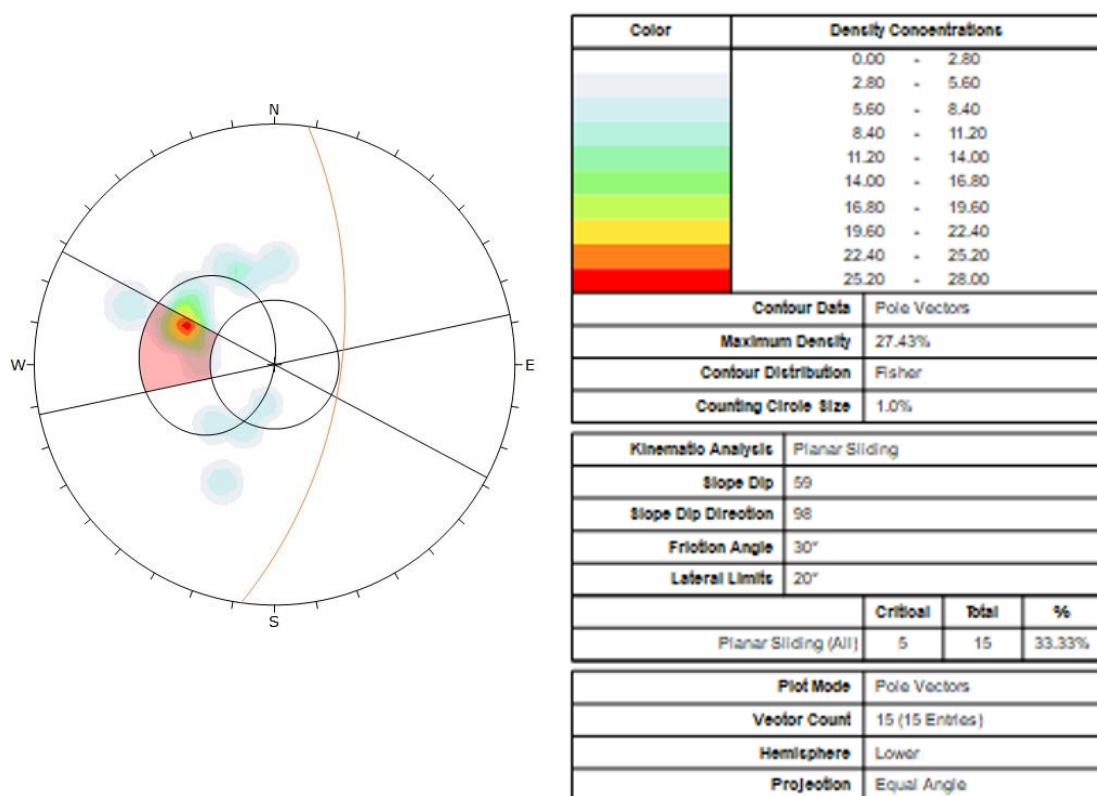


Figura 6.3.5.3: Análise cinemática para planar talude oeste - Autor (2022)

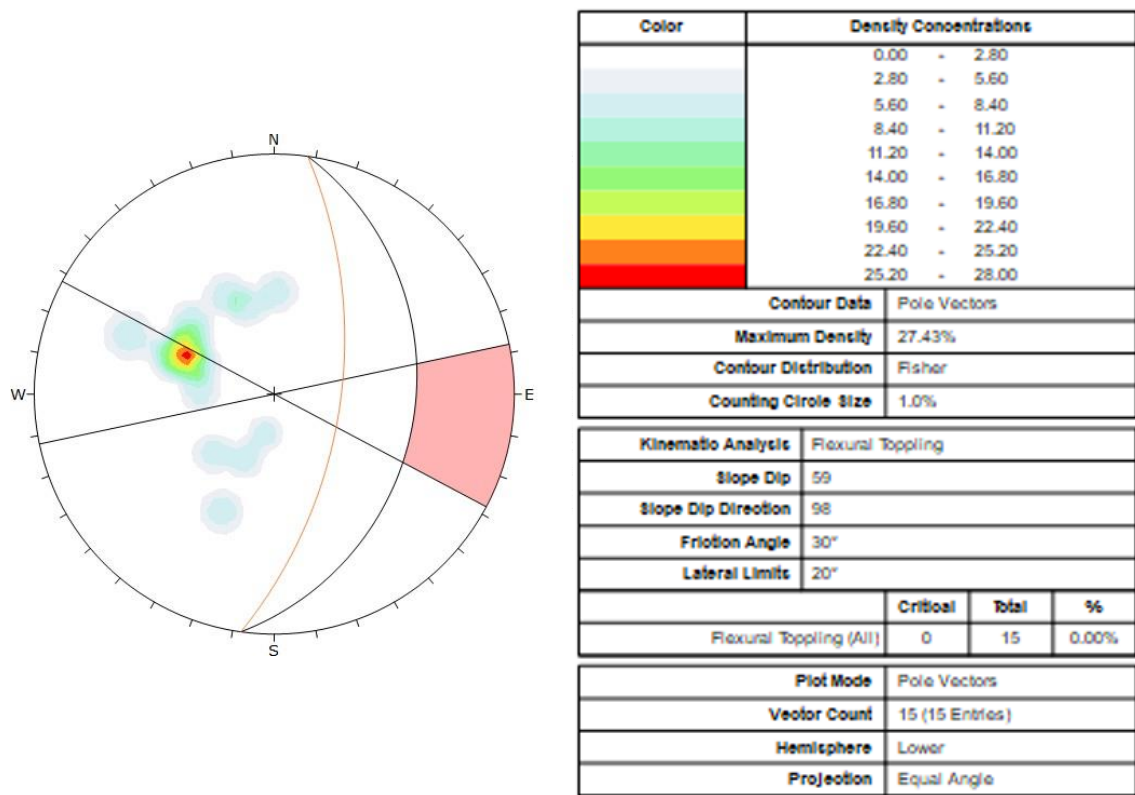


Figura 6.3.5.4: Análise cinemática para tombamento talude oeste - Autor (2022)

7. RECOMENDAÇÕES

Ao observar a alta probabilidade de ruptura em cunha sendo ela 59% no talude oeste, foram realizadas simulações no Software DIPS ROCSCIENCE com objetivo de redução dessas probabilidade, buscando minimizar o risco.

Uma das alternativas estudadas é a realização de alteração na inclinação do talude. Em levantamento feito no local, com inclinação do talude de 59°, tivemos 59% de probabilidade de ruptura. No entanto, quando a simulação foi realizada alterando a inclinação do talude na Figura 7.1 para 41°, obtivemos uma probabilidade inferior a 28%, ou seja, reduzindo a probabilidade de ruptura em 50%.

A segunda alternativa estudada envolveria a suaviação do talude (50°) e uma rotação dos talude conforme Figura 7.2. Com as alterações propostas foi possível obter uma probabilidade de ruptura de aproximadamente 28%, a diferença entre os dois cenários é que na primeira alternativa foi sugerido um ângulo que pode ser considerado muito suave operacionalmente (41°) e na segunda alternativa é possível atingir os mesmos valores com inclinações próximas de 50°, porém com necessidade de rotação dos taludes da parede oeste.

Portanto, para o talude leste que também teve alta probabilidade de ruptura em cunha deverá ser realizado as simulações considerando a inclinação do talude e rotação da cava, similar ao realizado no talude oeste.

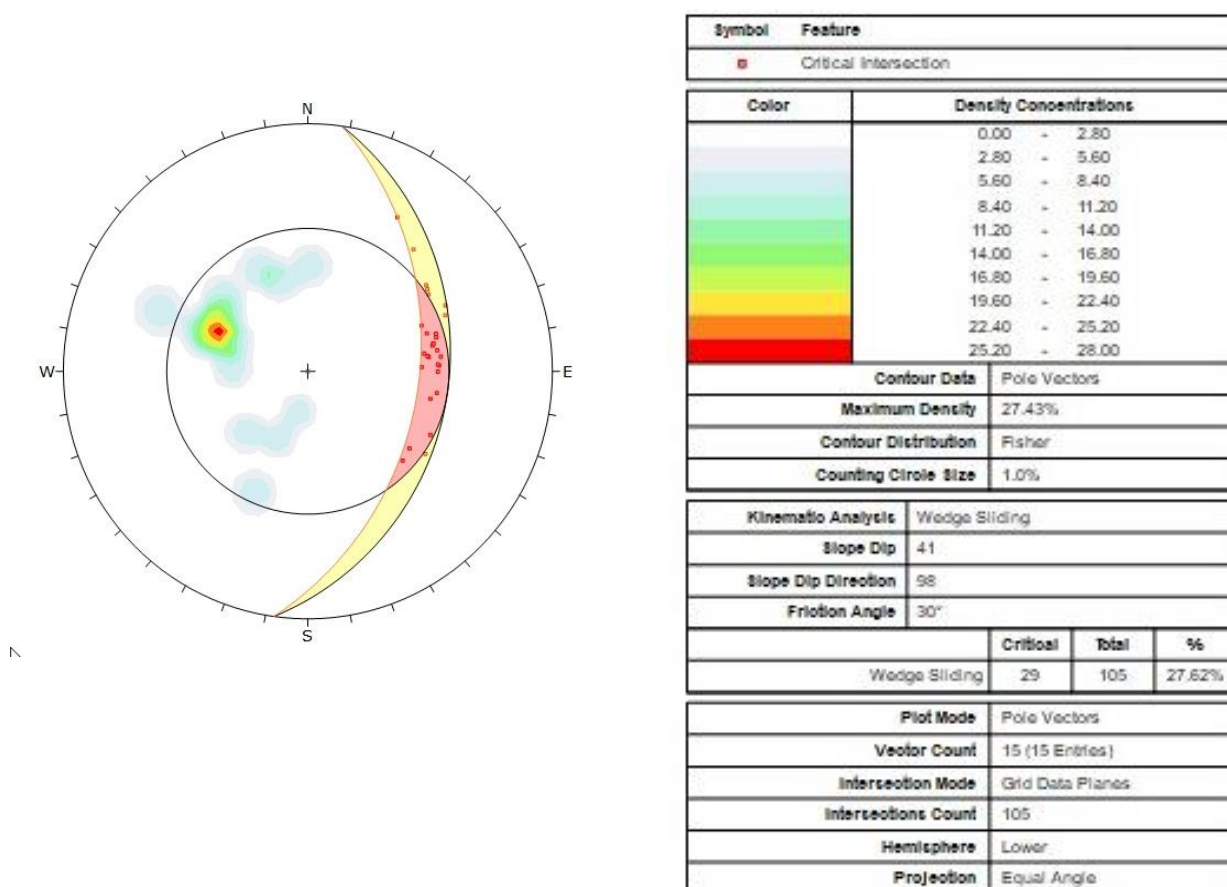
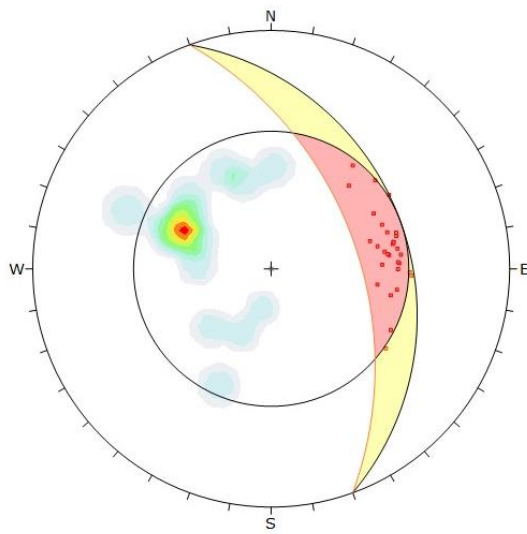


Figura 7.1: Análise cinemática para Cunha *slope dip 41* talude oeste - Autor (2022)



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.80
	2.80 - 5.60
	5.60 - 8.40
	8.40 - 11.20
	11.20 - 14.00
	14.00 - 16.80
	16.80 - 19.60
	19.60 - 22.40
	22.40 - 25.20
	25.20 - 28.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	27.43%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	50
Slope Dip Direction	70
Friction Angle	30°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	30	105	28.57%

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	15 (15 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	105
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura 7.2: Análise cinemática para Cunha *slope dip 50 e Direction 70* talude oeste - Autor (2022)

8. CONCLUSÕES

Ao realizar um levantamento geotécnico em campo, é possível identificar as estruturas do maciço rochoso. Isso permite a realização de novos levantamentos geotécnicos, que fornecem uma base para determinar os riscos de instabilidade do maciço rochoso.

Após importar os dados de campo no qual contemplava a orientação do talude assim como suas descontinuidades para o Software DIPS ROCSCIENCE, ficou conhecida a probabilidade de ruptura de cada talude, de acordo com cada método de ruptura, onde nesse trabalho foram verificados 3 modos de falhas, sendo eles: Cunha, planar e tombamento.

Contudo, avaliou-se o efeito das descontinuidades com relação à orientação dos taludes e foi possível identificar que o talude leste e oeste possuem elevada probabilidade de ruptura em cunha. Quando a direção da superfície do talude interceptada por dois planos de descontinuidade muda, a área formada tem a forma de uma cunha (Paz 2015). Os taludes leste e oeste apresentaram valores acima de 59% o que foi comprovado já na fase de campo, onde foi possível fotografar uma ruptura deste tipo no talude oeste (Figura 6.3.5.1).

Logo, sugere-se um estudo mais detalhado em que simulações alterando a direção e mergulho dos taludes possam ser avaliadas.

Com relação ao ângulo de atrito foi utilizado um valor padrão de 30° em todas as análises, porém o ângulo de atrito da descontinuidade pode afetar diretamente o resultado das análises. Portanto, tal fator mostra a necessidade de se realizar ensaios específicos para caracterização das estruturas presentes na cava.

De uma maneira geral a Cava apresenta taludes bem executados e devido a baixa altura global (inferior a 30 metros), não foram identificados riscos de rupturas iminentes durante o mapeamento.

Porém caso a cava apresente um projeto de expansão ou tenha sua lavra aumentada consideravelmente, novos estudos devem ser realizados visando o impacto dessa alteração.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica. Informações técnicas. Acesso em 1/5/2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11682: Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, p. 33. 2009.

BIENIAWSKI, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. Jonh Wiley & Sons, 251 pp.

CERRI, R.I., REIS F.A.G.V., GRAMANI, M.F., ROSOLEN V., LUVIZOTTO G.L., GIORDANO L.C., GABELINI B.M. 2018. *Assessment of landslide occurrences in Serra do Mar Mountain range using kinematic analyses. Environmental Earth Sciences*, 77:325-341.

DEER W.A., HOWIE R.A., ZUSSMAN J. 2013. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals. England*, Mineralogical Society, 3ª ed, 498 p. ISBN: 9780903056274

FIORI, A. P.; Carmignani, L. 2009. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 2ª. ed. Curitiba: Editora UFPR, 604 p.

FERIANE, L. B. 2021. Classificação geomecânica e análise cinemática de uma frente de lavra em pedreira de rocha ornamental no sul do espírito santo. Monografia, instituto federal do espírito santo, Espírito santo, 62 p.

FIORI, A.P., CARMIGNANI L. (EDS). 2015. Fundamentos de Mecânica dos Solos e das rochas - Aplicações na estabilidade de taludes. São Paulo, Oficina de Textos, 576 p.

FONTINHAS, ALEXANDRE. M. PEREIRA - Avaliação da estabilidade de taludes de escavação grauvaques da Formação de Mértola - Aplicação do SMR - Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica – Geotecnia - Universidade Nova de Lisboa 2012. 97 p.

HOEK, E. AND BRAY, J.W. (1981) *Rock Slope Engineering*. Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 341-351.

ISRM (INTERNACIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS). 1978. *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract. 15:319- 368.

KRAUSE O. 2014. *Refractory Ceramics*. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Electronic Release, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 35, p.1-59.doi: 10.1002/14356007.a23_001.pub2

MAIA, J.A.C. (2003). Métodos Probabilísticos Aplicados à Estabilidade de Taludes e Cavidades em Rocha. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-099/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasil, 192 p.

MCCOLM I.J. 2013. *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*. London, Springer, 3ª ed., 549 p. ISBN: 9789400709157, doi: 10.1007/978-94-007-0916-4

MURRAY H.H. 2000. *Clays*. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Electronic Release, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, v. 9, p. 203-233.

NADALIN, L.F. 2018. Análise estrutural e geotécnica voltada à estabilidade de taludes e maciços rochosos na br-116, Rio Grande Do Sul (RS). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, 97p.

PAZ, Valmor Madeira, Ítalo Gomes Gonçalves, Raul Oliveira Neto, Luis Eduardo de Souza, and Luciana Arnt Abichequer. "Levantamento das descontinuidades e avaliação da estabilidade de taludes da mina do Mangueirão." *Revista Monografias Ambientais* 14 (July 8, 2015): 98–115

READ, J. & STACEY, P. (2011). *Guidelines For Open Pit Slope Design*. Ed. John Read & Peter Stacey. CRC Press/ Balkema

RHI MAGNESITA. Site da RHI Magnesita, 2022. Quem somos, o que fazemos. Acesso em 06/11/2022.

ROCSCIENCE, Dips Overview. Disponível em:
<https://www.rocscience.com/help/dips/documentation>; em Acesso em 9 de Julho de 2022.

SEMLER C.E. 2006. *Refractories*. In: Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. (eds.). *Industrial Minerals & Rocks, commodities, Markets and Uses*.

Colorado, USA, Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., p. 1471-1476.
ISBN: 9780873352499.

VICTORIA, A. M. 2018. Recursos Minerais de Minas Gerais - Argilas e Minerais Refratários. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 60 p.