

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA
E DE MATERIAIS – PPGE3M

RAFAEL FRANCO E SILVA

ANÁLISE GEOTÉCNICA PARA DIMENSIONAMENTO DE BANCADAS E DIREÇÃO
DE EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Porto Alegre
2023

RAFAEL FRANCO E SILVA

ANÁLISE GEOTÉCNICA: DIMENSIONAMENTO DE BANCADAS E DIREÇÃO DE
EXTRAÇÃO DE ROCHA ORNAMENTAL

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais da Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como requisito parcial à obtenção do título
de doutor em Engenharia de Minas

Área de concentração: Tecnologia Mineral,
Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: André Cezar Zingano
Coorientador: Robson Ribeiro Lima

Porto Alegre
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patrícia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretora: Carla Schwengber Tem Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, MATERIAIS E METALURGIA – PPGE3m

Coordenador: Afonso Reguly

Vice -Coordenadora: Andréa Moura Bernardes

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Rafael Franco e
ANÁLISE GEOTÉCNICA PARA DIMENSIONAMENTO DE BANCADAS
E DIREÇÃO DE EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS / Rafael
Franco e Silva. -- 2023.
118 f.
Orientador: André Cezar Zingano.

Coorientador: Robson Ribeiro Lima.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Métodos numéricos em Rochas Ornamentais. 2.
Análise do Fator de Segurança. 3. Altura de Bancadas.
4. Direção Alongante. 5. Geotécnica Aplicada às Rochas
Ornamentais. I. Zingano, André Cezar, orient. II.
Lima, Robson Ribeiro, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

RAFAEL FRANCO E SILVA

**ANÁLISE GEOTÉCNICA: DIMENSIONAMENTO DE BANCADAS E DIREÇÃO DE
EXTRAÇÃO DE ROCHA ORNAMENTAL**

Esta tese foi analisada e julgada adequado para a obtenção do título de doutor em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Área de concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Aprovada em, _____/_____/_____

Prof. Dr. André Cezar Zingano (Orientador)

Prof. Dr. Robson Ribeiro Lima (Coorientador)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jorge Dariano Gavronsky
Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Iuri Borges Moura Aquino
Universidade Federal de Campina Grande – UAMG/UFCCG

Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros
Universidade Federal de Pernambuco – DEMINAS/UFPE

Prof. Dr. Júlio Cezar de Souza
Universidade Federal de Pernambuco – DEMINAS/UFPE

Dedico este trabalho a minha esposa Suzi Kelly, a meu filho Miguel e a meus pais Ferreira e Glaucinete, que estiveram presentes nos momentos bons e difíceis desta jornada, sempre me apoiando e incentivando para superar novos desafios.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar saúde e sabedoria para seguir essa jornada, em segundo lugar minha esposa Suzi, e meu filho Miguel que sempre me apoiaram e me acompanharam nesta caminhada. A meus pais, que sempre trabalharam para me dar a educação necessária para poder chegar a este ponto, sempre me apoiaram ao longo desta caminhada. Aos meus professores, que sempre me orientaram e guiaram minha caminhada acadêmica possibilitando a chegar neste momento. Ao meu orientador, André Zingano, que sempre forneceu o suporte necessário para o desenvolvimento da minha pesquisa. Ao meu coorientador Robson, que me mostrou diversas possibilidades e indicou os melhores caminhos a seguir neste contexto. Aos amigos e familiares, que muitas vezes não podemos estar juntos, mas sempre que possível apoiaram e vibraram com as conquistas. E a todos que de alguma forma contribuíram para chegar a este momento meu muito obrigado.

*“A Educação não transforma o mundo.
Educação muda as pessoas. Pessoas
transformam o mundo.”*

Paulo Freire

RESUMO

Sendo o Brasil 5º maior produtor de rochas ornamentais no cenário internacional, podem melhorar sua colocação, aumentando-se a recuperação do material pétreo que hoje se encontra em 30%, garantindo a segurança dos trabalhadores do setor, para isso é importante se realizar uma análise geotécnica adequada, obtendo valores de compressão uniaxial simples, determinar a qualidade do maciço rochoso, espaçamento entre as descontinuidades, mergulho e direção das mesmas, alterabilidade dentre outros fatores. A coleta dessas informações é de suma importância para poder realizar a análise da estabilidade dos taludes utilizando métodos numéricos, o setor de rocha ornamental utiliza o método do equilíbrio limite, que tem se mostrado falho em algumas análises, sendo então importante a mudança da técnica trazendo a inovação de aplicar o método de elementos finitos, que já consagrada em outras áreas, mas deve ser testada e validada para verificar seu potencial de aplicação. Para se realizar esse estudo, será caracterizado os maciços rochosos do estado do Espírito Santo, em busca de uma melhor forma de dimensionar suas bancadas, além de indicar a melhor direção de extração destas rochas. Sendo estudamos a bibliografia existente, coletando os principais métodos de análise propostos para o trabalho e estes são adaptados para utilização com rochas ornamentais, sendo realizados *scanlines*, nas frentes de extração, para só então ser calculado a qualidade do maciço rochoso e o mesmo transformado no índice de resistência geológica, de posse dessas informações estas são inseridas em um software que calcula a estabilidade de taludes por meio do método de equilíbrio limite e método de elementos finitos, nos entregando o resultado do fator de segurança e do fator de força. Para realizar essa avaliação utilizamos alturas de bancadas com 5, 20, 50 e 100 m, sendo os valores de compressão uniaxial simples utilizados de 75, 100, 125, 150, 175 e 200 MPa para rochas silicáticas e 75, 100, 125 MPa para rochas carbonáticas, essas simulações nos entregaram valores para o fator de segurança variando de 6,5 a 177,25, apesar desses valores serem altos e indicarem que o talude se encontra estável é importante avaliar a escolha adequada do índice de resistência geológica, pois apesar dos resultados encontrados ainda é possível verificar instabilidade nestes maciços. Já com o segundo métodos os valores variavam entre 1,00 a 20,00, demonstrando sim zonas de possível instabilidade e colapso das bancadas, demonstrando a importância de uma análise geotécnica adequada e a utilização de métodos de cálculos adequados. Como a utilização do fator de segurança é mais comum, foi possível elaborar uma correção entre esses dois fatores para que os usuários podem utilizar o valor mais adequado ao seu entendimento. Após a obtenção dos resultados da simulação teórica, o trabalho buscou exemplos reais para validar o desenvolvimento teórico e ajustar os resultados encontrados ao longo do trabalho, analisando algumas frentes de extração no estado em questão. Por fim, na última etapa, realizamos a mesma análise na rocha Preto São Marcos, onde com os dados de direção e mergulho das descontinuidades foi possível encontrar a direção alongante para a rocha, além da verificação da teoria elaborada nas etapas anteriores, onde foi possível verificar a estabilidade dos taludes e sua análise com alturas que melhor distribuirá as tensões residuais. Todos os dados obtidos foram transformados em um *script* que após a conclusão da fase front end, pode ser utilizado de modo fácil pelos usuários, optando assim sempre pela escolha das melhores práticas de extração do material. Com o término do estudo pode-se destacar a eficácia do método de elementos finitos nesta avaliação, já que ele consegue prever a instabilidade da zona de alteração, demonstrando a importância do trabalho critério da caracterização do maciço, possibilitando encontrar a direção alongante do maciço, maximizando sua extração. As alturas das bancadas afetam os valores de fator de segurança e do fator de força, assim como a qualidade de sua matriz rochosa.

Palavras chaves: Métodos numéricos em rochas ornamentais. Análise do fator de segurança. Altura de bancadas. Direção alongante. Geotecnia aplicada para rocha ornamental.

ABSTRACT

As Brazil is the 5th largest producer of ornamental rocks in the international scenario, they can improve their placement, increasing the recovery of stone material, which is currently at 30%, guaranteeing the safety of workers in the sector, for this it is important to carry out an analysis adequate geotechnical technique, obtaining simple uniaxial compression values, determining the quality of the rock mass, spacing between discontinuities, dip and direction, alterability, among other factors. Collecting this information is extremely important to be able to analyze the stability of slopes using numerical methods. The ornamental rock sector uses the limit equilibrium method, which has proven to be flawed in some analyses, making it important to change the technique, bringing the innovation of applying the finite element method, which is already established in other areas, but must be tested and validated to verify its application potential. To carry out this study, the rock masses in the state of Espírito Santo will be characterized, in search of a better way to size their benches, in addition to indicating the best direction for extracting these rocks. We studied the existing bibliography, collecting the main analysis methods proposed for the work and these are adapted for use with ornamental rocks, with scanlines being carried out on the extraction fronts, and only then can the quality of the rock mass be calculated and it transformed into the geological resistance index, once this information is available, it is entered into software that calculates slope stability using the limit equilibrium method and finite element method, providing us with the result of the safety factor and force factor. To carry out this evaluation, we used bench heights of 5, 20, 50 and 100 m, with the simple uniaxial compression values used being 75, 100, 125, 150, 175 and 200 MPa for silicate rocks and 75, 100, 125 MPa for carbonate rocks, these simulations gave us values for the safety factor ranging from 6.5 to 177.25, although these values are high and indicate that the slope is stable, it is important to evaluate the appropriate choice of the geological resistance index, because despite From the results found, it is still possible to verify instability in these masses. With the second method, values varied between 1.00 and 20.00, demonstrating areas of possible instability and collapse of the benches, demonstrating the importance of an adequate geotechnical analysis and the use of appropriate calculation methods. As the use of the safety factor is more common, it was possible to create a correction between these two factors so that users can use the value that best suits their understanding. After obtaining the results of the theoretical simulation, the work sought real examples to validate the theoretical development and adjust the results found throughout the work, analyzing some extraction fronts in the state in question. Finally, in the last stage, we carried out the same analysis on the Preto São Marcos rock, where with the direction and dip data of the discontinuities it was possible to find the stretching direction for the rock, in addition to verifying the theory elaborated in the previous stages, where it was possible check the stability of the slopes and their analysis with heights that will best distribute the residual stresses. All data obtained was transformed into a script that, after completing the front end phase, can be easily used by users, thus always choosing the best practices for extracting the material. With the end of the study, it is possible to highlight the effectiveness of the finite element method in this evaluation, as it can predict the instability of the alteration zone, demonstrating the importance of the criterion work of characterizing the mass, making it possible to find the stretching direction of the mass, maximizing its extraction. The heights of the benches affect the safety factor and strength factor values, as well as the quality of their rock matrix.

Keywords: Numerical methods in dimension stone. Safety factor analysis. Bench height. Elongation direction. Applied geotechnics for ornamental stone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Pilha de rejeito em frente de extração de rocha ornamental.	15
Figura 2 – Frente de extração com bancadas de alturas diferentes.	17
Figura 3 – Mapa geológico do estado do Espírito Santo, em amarelo local das pedreiras utilizadas para validação da hipótese.	23
Figura 4 – Mapa geológico do estado da Paraíba, no quadrado em vermelho região da pedreira escolhida para o trabalho.	25
Figura 5 - Classificação das Rochas Ornamentais quanto a sua mineralogia.	26
Figura 6 - Pedreira de rocha ornamental, realizada no topo de uma montanha.	27
Figura 7 - Tipos de deformações estruturais.	28
Figura 8 - Modelos de comportamento de tensão deformações para os materiais rochosos.	29
Figura 9 – Métodos de extração de rochas ornamentais.	30
Figura 10 – posicionamento da perfuração para extração de rochas ornamentais.	31
Figura 11 – Em vermelho a boca de lobo cortada e em amarelo os furos para realização do desmonte da mesma.	32
Figura 12 - Extração por meio de bancada baixa.	33
Figura 13 - Modelo de bancada alta, para extração de rocha ornamental.	34
Figura 14 - Modelo de bancada ultra alta, para extração de rocha ornamental.	36
Figura 15 - Forças atuantes em blocos de taludes rochosos.	37
Figura 16 – Curvas de Tensão deformação de um ensaio de compressão uniaxial simples, onde se pode obter o modulo de elasticidade.	39
Figura 17 - Determinação do índice GSI.	41
Figura 18 - Tipos de rupturas mais comuns em maciços rochosos e suas leituras estereográficas.	44
Figura 19 - Tipos de rupturas planares, em maciços rochosos.	45
Figura 20 - Ruptura do tipo cunha, onde é possível verificar os ângulos de interseção.	46
Figura 21 - Modelo de ruptura flexural.	47
Figura 22 – Ábaco de avaliação das condições de deslizamentos ou tombamento de blocos, sobre planos inclinados.	48
Figura 23 – Perfil de rugosidade típico para juntas, segundo o critério de Barton Bandis.	50
Figura 24 - Modelo de elementos finitos, que após a discretização é possível observar os diversos triângulos formados e os vetores que formam as equações diferenciais.	54
Figura 25 - Modelo de tensões atuantes em um maciço rochoso.	58
Figura 26 - Mapa com a movimentação das placas tectônicas.	59
Figura 27 - Utilização de bússola geológica para medir as atitudes das fraturas.	60
Figura 28 - Diagrama de rosetas onde é possível verificar as direções das fraturas.	61
Figura 29 - Inserção de dados no software Slide®, onde observamos em vermelho os locais citados no parágrafo acima.	65
Figura 30 – Imagem para definição das propriedades da rocha, que vão ser simulados neste trabalho.	66
Figura 31 - Imagem onde é possível verificar a malha para cálculo das tensões normais e cisalhantes, assim como as restrições de movimento das bordas.	67
Figura 32 – Dados de direção e mergulho inseridos no software, e o diagrama de rosetas para as interpretações.	68
Figura 33 – Scanline de 10 m, nas frentes das bancadas de rochas ornamentais típicas do noroeste capixaba.	69
Figura 34 – Gráfico de distribuição de valores de UCS, para rochas do tipo silicáticas.	71

Figura 35 – Gráfico de distribuição de valores de UCS, para rochas do tipo carbonáticas	72
Figura 36 – Imagem obtida por meio do software slide, com uma altura de bancada de 50m e valores de compressão uniaxial de 125 Mpa.	74
Figura 37 - Gráfico de correlação entre fator de segurança x altura de bancada, para rochas do tipo silicática.....	76
Figura 38 - Talude onde é possível se verificar um tratamento de extração da região instável.	77
Figura 39 – Gráfico de correlação entre o fator de segurança e altura da bancada.	80
Figura 40 - Simulação de um mármore com altura de 50m e valor de compressão uniaxial de 100 MPa. onde se encontra marcada a superfície de ruptura analisada.	81
Figura 41 – Valores da altura do talude rochoso x FF, para os diferentes valores de UCS.	83
Figura 42 – Simulação de uma bancada de rocha ornamental com 100m de altura, onde vemos a distribuição de seus valores de FF ao longo do corpo.....	85
Figura 43 – Valores de FF, para rochas carbonáticas e suas alturas.	86
Figura 44 - Simulação de rocha carbonática, para obtenção do valor de FF com altura de 50m.....	87
Figura 45 - Gráfico de correlação para valores de MEF e MEL em rochas silicáticas.	88
Figura 46 - Correlação dos dados do MEF e MEL para mármore.	89
Figura 47 - Frente de extração do material Gold 500 (à esquerda) Maciço rochoso de onde se extrai a rocha ornamental Verde Jade (à direita).....	91
Figura 48 - Comportamento do FF ao longo do maciço rochoso em uma bancada de 50 m.	92
Figura 49 - Comportamento do FS ao longo do maciço rochoso em uma bancada de 50 m.	93
Figura 50 - Comportamento do FS e FF em relação à altura das bancadas utilizando as duas formas de análise.....	94
Figura 51 - Descontinuidade na direção da topografia do maciço.	96
Figura 52 - Frente de extração da pedra ornamental Amarelo Icarai à esquerda. À direita, o soft Yellow, onde a linha de varredura de 10m ou mais pode ser vista em vermelho. Para mais detalhes sobre o tipo de rochas, consulte o texto abaixo.....	97
Figura 53 - A) Rugosidade da descontinuidade. B) Perfil de rugosidade de Barton.....	98
Figura 54 - A) Força residual em σ_1 . B) Força residual em σ_3 . C) FF para frente da pedra, não tendo problema de estabilidade.....	99
Figura 55 - A) Força residual em σ_1 . B) Força residual em σ_3 . C) FF para frente da pedra, não tendo problema de estabilidade.....	100
Figura 56 - Em vermelho, a região da descamação, onde foi necessário tratamento para evitar a queda do material.....	101
Figura 57 - Frente de extração da pedra ornamental, onde pode ser observado a scanline em vermelho.....	103
Figura 58 - Valores de FS simulados em software de MEF, que determinam a segurança dos trabalhos de extração.	104
Figura 59 - Gráfico demonstrando os valores de FF x Altura das bancadas.	105
Figura 60 - Região com desmonte recente onde é possível observar blocos soltos no talude.	107
Figura 61 - Diagrama de Rosetas obtidos por meio do software dips e frente de extração do preto são marco obtido no Google earth.....	108
Figura 62 - A esquerda comportamento de σ_1 atuando na frente de extração, já na figura da direita temos os valores de σ_3	109
Figura 63 - Modelo da frente de extração do preto São Marcos, com avaliação do fator de força.....	110
Figura 64 – Tela do software desenvolvido para este trabalho.	111
Figura 65 – Scrip para indicar a direção alongante das rochas ornamentais.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre bancadas altas e ultra altas.....	31
Tabela 2 – A seguir, podemos verificar como obter os valores do fator de distúrbio em bancadas, desenvolvido por Hoek.....	43
Tabela 3 - Sistema de classificação RMR.....	49
Tabela 4 - Classes de maciço rochoso RMR (1989).	51
Tabela 5 – Valores de dips e dips Direction, das juntas encontradas no maciço do preto São Marcos.	68
Tabela 6 – Valor do RMR, GSI e modulo de elasticidade das rochas.	69
Tabela 7 – Valores de fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI.	75
Tabela 8 – Valores de fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI com 82 e 70.....	76
Tabela 9 - Valores do fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI.	79
Tabela 10 - Valores do fator de seguranças relacionadas à altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI com 90 e 80.....	79
Tabela 11 – Valores do fator de segurança, utilizando MEF.	82
Tabela 12 – Valores de qualidade do maciço rochoso (RMR), obtidos por meio de investigação geotécnica, em uma frente típica de rocha ornamental.	84
Tabela 13 – Apresentação dos valores do Fator de segurança, obtidos para os mármorees.....	87
Tabela 14 - Valores de RMR e GSI obtidos por meio de análise geotécnica.....	90
Tabela 15 – Valor do RMR e GSI, calculado por meio da figura 49.....	97
Tabela 16 - Valor do RMR, calculado por meio da figura 54.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Az	Azimute
FS	Fator de Segurança
FF	Fator de Força
GSI	Índice de resistência geológica
JCS	Resistência à compressão da junta
JRC	Coeficiente de rugosidade da junta
MEL	Método de equilíbrio limite
MEF	Método de elemento finito
RMR	Classificação de maciço rochoso
RO	Rocha Ornamental
RQD	Designação da qualidade de rocha
UCS	Resistência à compressão uniaxial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA	18
1.2	ORGANIZAÇÃO DA TESE	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.3.1	Objetivos Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	20
2	ÁREA DE ESTUDO	21
2.1	GEOLOGIA BRASILEIRA	21
2.2	GEOLOGIA DO ESPÍRITO SANTO	22
2.3	GEOLOGIA DA PARAÍBA	24
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
3.1	EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS	29
3.2	BANCADAS BAIXAS	33
3.2	BANCADAS ALTAS	34
3.3	BANCADAS ULTRA ALTAS	35
3.4	FATOR DE SEGURANÇA	36
3.5	ANISOTROPIA	38
3.6	MÓDULO DE YOUNG	39
3.7	ÍNDICE DE FORÇA GEOLOGICA - GSI	41
3.8	FATOR DE DANO	42
3.9	TIPOS DE RUPTURAS	43
3.9.1.	Planar	45
3.9.2.	Cunha	46
3.9.3.	Flexural	47
3.10	CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO - RMR	48
3.11	MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE	52
3.12	MÉTODOS NUMÉRICOS	53
3.13	CRITÉRIO DE HOEK BROWN	55
3.14	TENSÕES	57
3.15	DIREÇÃO E MERGULHO	60
4	METODOLOGIA	63
5	RESULTADOS	71
5.1	MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE	73
5.1.1	Rochas Silicáticas	73

5.1.2	Rochas Carbonáticas	78
5.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	81
5.2.1	Rochas Silicáticas	82
5.2.2	Rochas Carbonáticas	86
5.2.3	Correlação MEL x MEF	88
5.3	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	90
5.3.1	Rochas Silicáticas	90
5.3.2	Rochas Carbonáticas	102
5.4	MODELO DE DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE EXTRAÇÃO	107
5.5	MODELO DE SOFTWARE	111
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
	REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

O setor de rochas ornamentais (RO), no ano de 2019, movimentou US \$87 bilhões, concentrado em apenas cinco países que detém o domínio de 67,5% do mercado internacional. O Brasil se encontra dentro deste grupo, correspondendo a 5,4% do mercado internacional (MONTANI, 2021). No ano de 2021, as exportações brasileiras deste material somaram um montante de US\$ 1,34 bilhões, de matérias, blocos e chapas de granito, mármore, dentre outros (Chiodi Filho, 2022).

Apesar de todo volume movimentado pelo setor, este corresponde a aproximadamente 10 a 30% de todo o volume movimentado na pedreira de rocha ornamental, sendo sua recuperação considerada baixa como pode ser observado na figura 1, o excesso de material sem padrão ornamental destinado em suas pilhas de rejeito. Desta forma buscamos uma redução de perda do material pétreo por alívio de tensões, isso ocorre quando encontramos a direção da tensão principal, por meio de uma análise geotécnica de detalhe.

Figura 1 – Pilha de rejeito em frente de extração de rocha ornamental.



Fonte: autor, 2022

Para se realizar uma análise geotécnica deve-se entender que o maciço rochoso é composto por rochas intactas e estruturas geológicas. Estas quando sofrem grandes esforço podem sofrer, podem se romper ou deformar, sendo necessário aprofundar o conhecimento das análises de mecânica de rochas para se classificar estes maciços (OSINERGMIN, 2017).

Para se realizar a classificação destes maciços em grande escala, existem principalmente três grandes técnicas, o sistema de classificação de maciço rochoso (RMR), o sistema Q desenvolvido por Barton e por fim o Índice de resistência geológica (GSI), estes são parâmetros de entrada para várias técnicas de simulação numérica, podendo classificar aquele domínio geológico com um único valor (OSINERGMIN, 2017).

Para se classificar os maciços utilizando estes sistemas se faz necessário conhecer a resistência da compressão uniaxial simples da rocha intacta, a resistência a tração, o seu módulo de elasticidade, o seu valor de Poisson, as propriedades físicas da rocha e a resistência triaxial (OSINERGMIN, 2017). Além do conhecimento das descontinuidades do maciço, e com este conhecimento das descontinuidades pode-se encontrar a direção da tensão principal que atuou no maciço e por consequência a melhor direção de extração que aqui será chamada de alongante. Após se encontrar essa direção, é possível aumentar a recuperação do material, minimizando impactos ambientais.

Além de estarmos preocupados com o aumento de recuperação do setor, se faz necessário uma atenção à sua segurança. Já que o setor mineral é um dos mais perigosos, e o Brasil gasta anualmente devido a acidentes do trabalho, em todos os setores, o valor de R\$ 70 bilhões (Castro e Freire, 2016). O setor de rochas ornamentais registou no ano de 2021, um total de 158 acidentes de trabalho, nos quais 116 foram acidentes típicos, devido às atividades laborais, das quais segundo os comunicados do SINDIMÁRMORE no Espírito Santo, 11 foram fatais (MINISTÉRIO DA PREVIDÊNCIA SOCIAL, 2023).

É necessária uma redução destes acidentes no setor mineral, pois estes trazem grandes prejuízos aos cofres públicos. Segundo Castro e Freire (2016), os principais tipos de acidente são o de tombamento de taludes, projeção de fragmentos, utilização de explosivos, com máquinas, equipamentos e partes móveis. Para reduzir o número de acidentes no setor de Rochas Ornamentais, deve-se sempre buscar boas práticas no manuseio de explosivos, movimentação de carga e estabilização de taludes.

Ao longo deste trabalho será abordado boas práticas para estabilização de taludes, já que a mineração de modo geral devido a critérios de segurança, trabalha com bancadas que tem sua

altura variando de 10 a 15 m, garantindo assim uma maior segurança nas operações de desmonte do material rochoso. Porém, a extração de rocha ornamental segue na contramão do que é convencional na maioria das minerações, já que esta trabalha com alturas de bancadas que vai desde 2 m até mais de 100 m. Gerando assim uma preocupação em relação à estabilidade destes taludes com alturas elevadas.

Com essa preocupação, tendo o objetivo de reduzir o número de acidentes, será estudado neste trabalho a estabilidade de taludes, para as alturas convencionais de 5, 20, 50 e 100 m, como podemos observar na figura 2. Perseguindo a ideia da segurança para os colaboradores e equipamentos da empresa, pode-se auxiliar na redução do risco de acidentes por deslizamento de taludes, tornando a atividade de mineração de rocha ornamental mais segura para seus colaboradores.

Figura 2 – Frente de extração com bancadas de alturas diferentes.



Fonte: Autor, 2022

Na figura em questão é possível observar em destaque uma região onde foi realizado um trabalho preliminar de desmonte da camada de alteração, pois a mesma se encontrava em iminência de deslizamento, gerando risco a atividade de mineração. Porém, a análise de estabilidade dos taludes neste setor é realizada pelo método de equilíbrio limite, tendo seus

laudos atestando taludes seguros, mas não prevendo o deslizamento destas camadas de alteração.

Esse trabalho vem abordar no seu ineditismo a utilização da metodologia de análise de elementos finitos, no setor de rocha ornamental. Essa técnica muito difundida, porém, não utilizada por esse setor, para sua aplicação é necessário a utilização de ferramentas e tecnologias já conhecidas, para verificar se é possível prever o deslizamento das camadas de alteração, além de atestar a sua estabilidade.

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

O setor de rochas ornamentais, apesar de antigo no Brasil, na sua maioria é desenvolvido por empresas familiares, o que de certa forma dificulta o trabalho técnico, pois estas são pequenas e médias mineradoras e as mesmas não têm grandes investimentos em pesquisas, dependendo assim de entidades de pesquisa que desenvolvam e divulguem essas informações, para poderem ser aplicadas nas suas frentes de extração.

Com o desenvolvimento deste setor, as suas bancadas estão com alturas cada vez mais elevadas, gerando questionamentos em relação a sua estabilidade. Nas literaturas pouco se fala da estabilização destes tipos de taludes, com as suas alturas variando de 5 a mais de 100 m. Este trabalho vem cumprir o objetivo de trazer mais informações a respeito deste tema, adaptando ferramentas e técnicas consagradas a realidade do setor, possibilitando a sua aplicação de forma fácil, por qualquer pessoa da equipe da frente de extração.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE

No capítulo um, introduzimos o setor de rochas ornamentais demonstrando a sua importância no âmbito nacional e internacional, abordamos os principais objetivos desta pesquisa e a sua relevância para este setor e como este trabalho se encontra com os seus temas distribuídos em capítulos. Já o segundo, demonstramos de forma ampla a geologia regional da área de estudo assim como o seu mapa estrutural.

O capítulo 3, realizamos uma revisão bibliográfica de todos os assuntos que foram necessários para se realizar este trabalho, dentre esses assuntos temos os tipos de ruptura para rochas ornamentais e o critério para a caracterização geotécnica, com o intuito de se obter o fator de segurança e os seus métodos de dimensionamento.

Com o capítulo 4, fizemos uma abordagem da metodologia utilizada para desenvolver o trabalho em questão, com todos os seus passos e inclusive inserção em *softwares* específicos para se determinar os valores do fator de segurança.

O Quinto, trazemos os resultados das simulações para os materiais silicáticos e carbonáticos, utilizando os métodos de equilíbrio limite e elementos finitos, bem como uma comparação dos dois métodos e alguns estudos de casos que comprovam as hipóteses levantadas no trabalho e por fim ainda foi possível com as análises geotécnicas determinar a melhor direção de extração de rochas ornamentais, possibilitando um aumento na sua recuperação.

No sexto capítulo, trabalhamos as considerações finais onde é possível se chegar com esta pesquisa e além de propostas para serem desenvolvidas em outras pesquisas, possibilitando assim uma continuidade do trabalho.

1.3 OBJETIVOS

Pensando na melhoria do setor de rochas ornamentais, este trabalho vem buscar um avanço nas demandas de segurança no que tange a estabilidade de taludes, e um acréscimo nos valores de recuperação da extração do material pétreo por meio da identificação da direção alongante, reduzindo assim os impactos ambientais e redução de custos deste setor.

1.3.1 Objetivos Geral

Para obter uma melhora na segurança, se faz necessário a criação de uma metodologia de fácil aplicação para o setor de rochas ornamentais, esta deve seguir com uma análise dos parâmetros geotécnicos e procedimentos de fácil utilização, devido ao baixo grau de instrução dos colaboradores destas empresas.

Uma boa coleta de dados garante uma boa análise geotécnica, seja está realizada em campo ou em laboratório, é de suma importância para a obtenção das alturas máximas que as bancadas podem atingir, bem como a melhor direção de extração deste material. Sendo necessária a criação de um ábaco e/ou um aplicativo que informe os resultados de forma simples e direta para sua aplicação.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Demonstrar de forma prática como realizar a análise geotécnica;
2. Avaliar as alturas das bancadas de rochas ornamentais determinando a sua segurança;
3. Encontrar a direção mais adequada para se realizar a extração de rocha ornamental;
4. Criar um *software* para auxiliar na obtenção das informações.

2 ÁREA DE ESTUDO

Sendo o estado do Espírito Santo um importante produtor de rochas ornamentais no país, detendo mais de 70% de toda a produção do setor e uma abundância de frentes de extração com os mais diversos modelos de altura de bancadas. É natural a sua escolha para avaliarmos a estabilidade dos seus taludes, criando assim ferramentas de análise, bem como analisar a hipótese encontrada por este trabalho.

Já a escolha do estado da Paraíba se deve no primeiro momento para validar as hipóteses desenvolvidas pelo modelo do estado do Espírito Santo, verificando assim se pode ser considerado um modelo nacional ou local. Em um segundo momento, devido as grandes tensões sofridas pelas rochas deste estado, nos possibilita a encontrar a direção principal de extração de forma mais clara, sendo possível desenvolver melhor a técnica sugerida.

2.1 GEOLOGIA BRASILEIRA

No Brasil o processo erosivo, ao longo de milhares de anos, possibilitou que estas rochas que foram formados em grandes profundidades se tornassem aflorantes ou aparecerem próximo à superfície, estes possuindo a textura e a coloração ideal para o mercado consumidor, podendo ser exploradas como rochas ornamentais.

Essas rochas muitas vezes se formam como Batólitos, que são rochas plutônicas com mais de 100 km², são consolidados em profundidade, ficando preso na rocha encaixante até se resfriar, formando os cristais e a textura adequada para serem utilizadas como piso, fachadas, ladrilho dentre outras (Teixeira et al., 2000).

Os corpos rochosos sofrem com muitas tensões durante o seu resfriamento. Oriunda do movimento do magma e das placas tectônicas, elas geram mudança de dimensões e volume. São encontradas aos pares na mesma intensidade e direção opostas, sendo aplicadas nos três eixos cardinais (x, y e z) ortogonais entre si, ou seja, se elas estão em equilíbrio o maciço não sofre alteração, mas quando as mesmas não estão, o mesmo altera as suas dimensões (Fiori e Wandresen, 2014).

A diversidade geotectônica nacional inicia a sua história no arqueano no período recente. Na sua evolução essas rochas passaram por grande alternância entre processos

compressivos e distensivos. A consolidação do embasamento que gerou as ROs ocorreu de forma cíclica, relacionado ao Arqueano, Paleoproterozoico, Mesoproterozoico, Neoproterozoico. Favorecendo a consolidação dos núcleos de idade arqueana, envolvidos em faixas dobradas (Vidal et al., 2013).

A aplicação dessas forças aumenta a probabilidade de formação de instabilidades dinâmicas como deslocamentos que ocorrem no topo da bancada, levando a abertura de trincas na camada mais superficial e em casos mais críticos ao deslizamento desta. Estas instabilidades, tornando-se problemas sérios de segurança que põe em perigo a vida do pessoal na obra e a integridade dos equipamentos.

Exemplos como os citados acima, reforça a importância para o estudo destes fenômenos, para este método de lavra. Os problemas causados pela ruptura brusca, não se limita a acidentes ou perdas de vida, mas também em atrasos na extração e atendimento dos clientes, diminuindo o rendimento e dificultando o avanço, tornando-se um problema operacional e de segurança sério que é finalmente refletido nos custos do projeto. Isto pode ser previsto desde as etapas iniciais, o qual requer um bom conhecimento das feições geológicas, propriedades geomecânicas e estado de tensões in situ do maciço rochoso.

2.2 GEOLOGIA DO ESPÍRITO SANTO

Este estado tem o setor de rocha ornamental como destaque na sua economia, participando do seu PIB com 10%, gerando entorno de 200.000 empregos diretos e indiretos. Este é responsável por 70% das exportações do setor em todo o país. O investimento neste se concentra em 90% no estado do Espírito Santo (Sardou Filho, 2013, apud Silva et al., 2020).

O Brasil pode extrair e beneficiar vários tipos de rochas ornamentais com aproximadamente 1.200 variedades. Sendo este material advindo de 1.500 frentes de lavra diferentes, com uma produção média de 520 toneladas por trabalhador, sendo predominante rocha silicáticas (Sardou Filho, 2013, apud Silva et al., 2020).

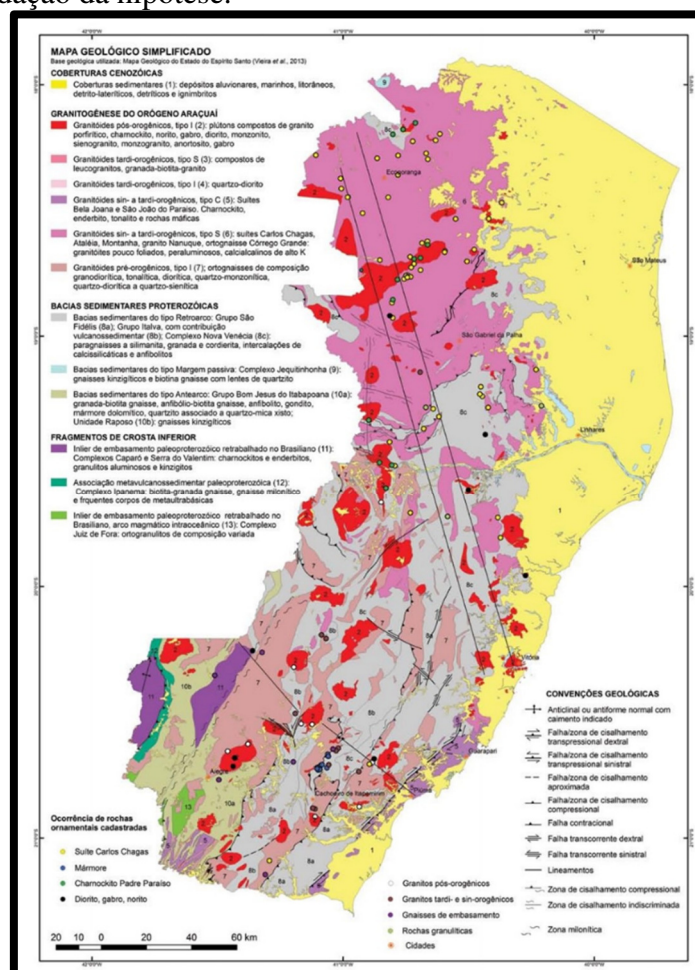
No Espírito Santo, muitos empreendimentos que tentaram iniciar a extração em meia encosta na parte inferior do maciço rochoso não obtiveram sucesso, já que esta região contém altos índices de tensão, fazendo com que ao se extrair o material, o mesmo passasse por um

processo de alívio de tensões, apresentando fraturas que antes não se encontravam presentes, tornando a lavra dessas rochas praticamente inviáveis (Maior, 2016).

Este encontra-se inserido no sistema orogênico da Mantiqueira, sendo sua geotectônica de idade Neoproterozoico na direção NNE – SSW, encontrando-se a sua borda na porção leste do cráton do São Francisco. Sendo constituída por um cinturão de rochas metamórficas, dobradas em parte migmatizadas, tendo suítes granitoides de idades e natureza composicional diversas, comprovando a existência de eventos magmáticos distintos ao longo da sua evolução orogênica (Sardou Filho, 2013, apud Silva et al., 2020).

Sendo seu embasamento cristalino finalizando sua história geológica, indo do Paleoproterozóico aos eventos Neoproterozoico, relacionados à Orogênese Brasileira e, posteriormente, modificada durante o Fanerozoico, como pode ser observado na figura 3 (Sardou Filho, 2013, apud Silva et al., 2020).

Figura 3 – Mapa geológico do estado do Espírito Santo, em amarelo, local das pedreiras utilizadas para validação da hipótese.



Fonte: Vieira et al, 2018

2.3 GEOLOGIA DA PARAÍBA

A Paraíba está inserida na subprovíncias do Rio Grande do Norte e Transversal, onde se encontra limitado por um dos seus principais lineamento que se chama Patos. Iniciando no Arqueano e estendendo-se até o Paleoproterozoico, tendo a sua estabilidade no Neoproterozoico (Lima et al., 2017).

Este é formado na sua maior parte por rochas Precambrianas, que cobrem cerca de 80% da sua área, este está incluída na Província Borborema, com idade Meso a Neoproterozóica. Zonas de cisalhamento, principalmente de idade Neoproterozóica, separam esses domínios tectonoestratigráficos e constituem as principais feições geotectônicas do Estado (Santos et al., 2002).

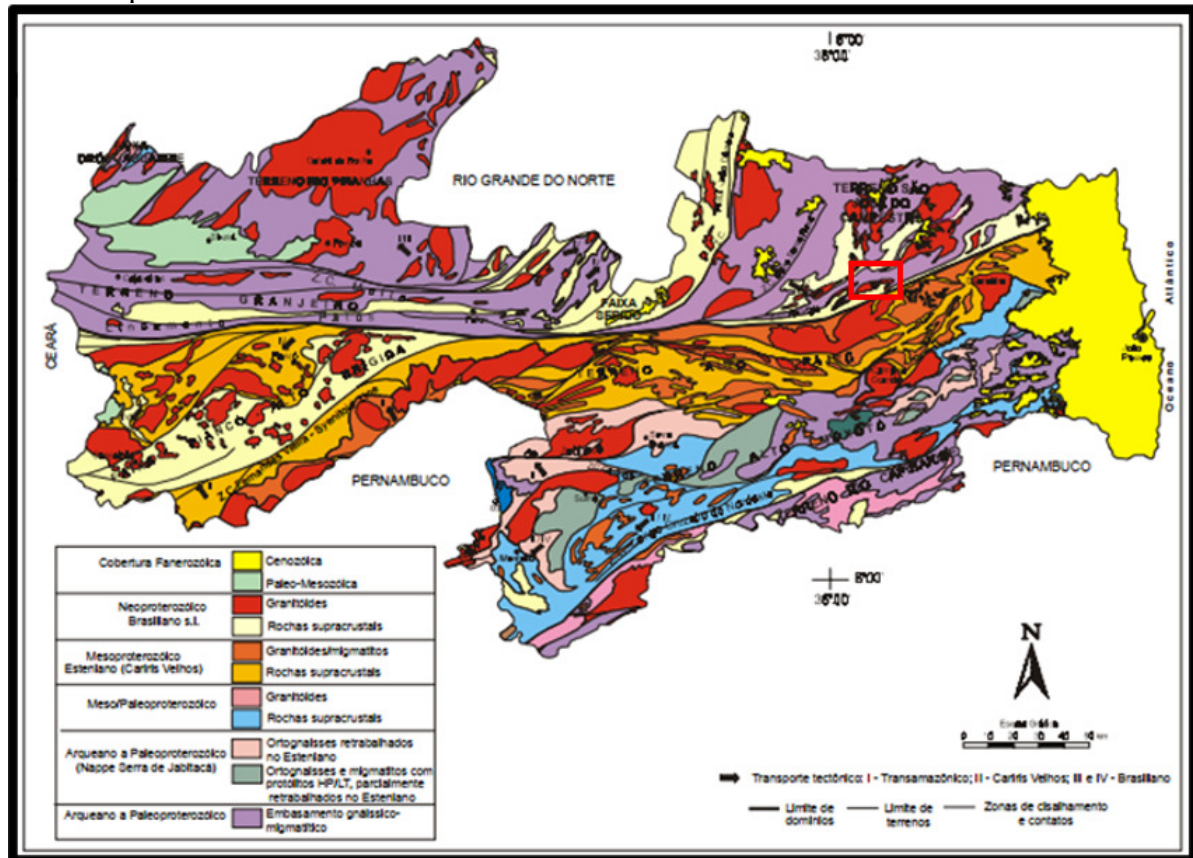
O Brasileiro é o principal evento tectonometamórfico dessa porção, afetando tanto o embasamento quanto a cobertura metamórfica, e originando uma intensa atividade granítica. A sub-província transversal é dominada por terrenos e faixas dos ciclos Cariris Velhos e brasileiro, os quais culminaram com dois eventos orogênicos sucessivos, gerando um complexo sistema de *fold-thrust belts* e rede de zonas de cisalhamento transcorrentes associados a um extraordinário plutonismo granítico (Santos et al., 2002).

Estes eventos tectônicos, durante o processo de formação das rochas, favoreceu a geodiversidade da região para formar jazimentos de rochas ornamentais, incluindo neste contexto rochas de utilização mais nobres e com excelente aceitação no mercado. Obtendo rochas do tipo movimentadas, rochas de coloração escuras, rochas do tipo xisto. E com Plutonismo Máfico precoce temos rochas escuras, incluindo o preto São Marcos, que será nosso objeto de estudo.

Os outros 20% que restam do Estado, são representados por uma parte da bacia do Araripe, pelas bacias do Rio do Peixe e Pernambuco-Paraíba, de idade cretácea e ligada à evolução Atlantiana da plataforma sul-americana, e por coberturas continentais paleógena-neógenas continentais, como observado na figura 4 (Santos et al., 2002).

Foram catalogados aproximadamente 1.008 minerais, entre ocorrências, garimpos, depósitos e minas. Bentonita, ilmenita, zirconita, cianita, caulim, calcário sedimentar e cristalino, granitos para fins ornamentais, vermiculita, argilas, pedra britada, feldspato, água-marinha, turmalina azul e água mineral são os principais recursos lavrados no Estado (Santos et al., 2002).

Figura 4 – Mapa geológico do estado da Paraíba, no quadrado em vermelho região da pedra escolhida para o trabalho.



Fonte: Santos et al, 2002

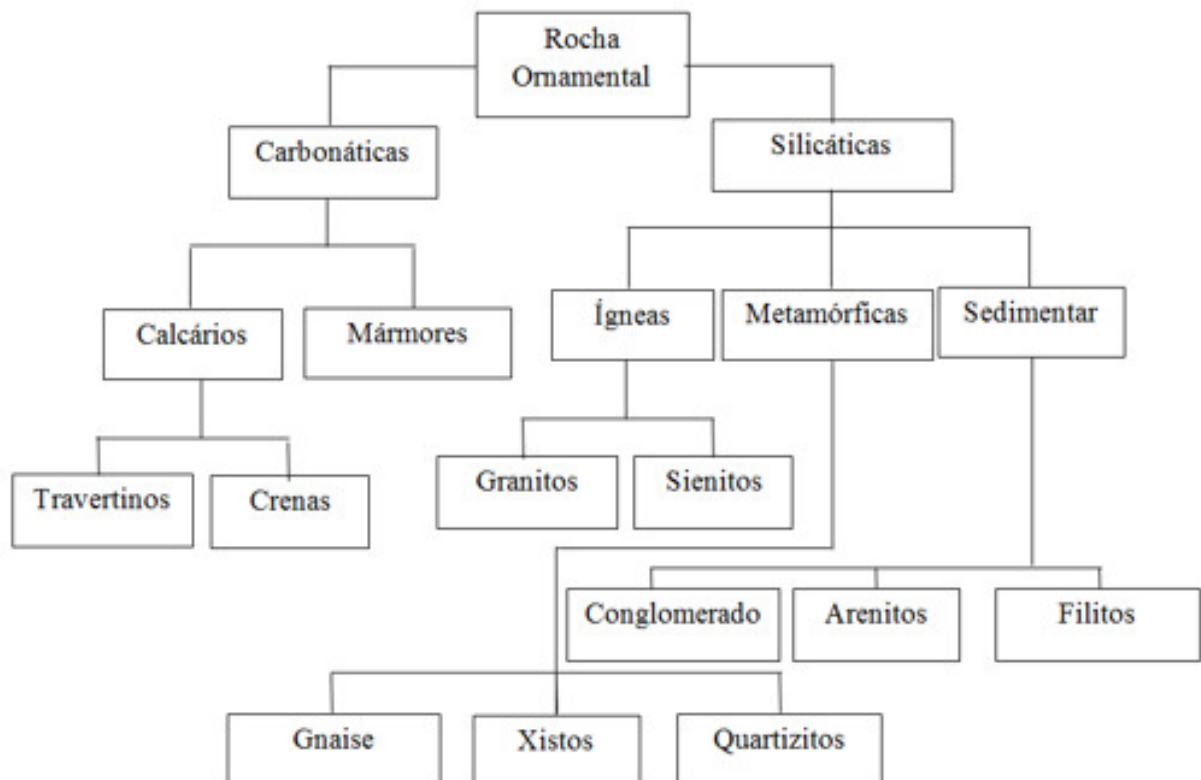
Os minerais Paraibanos foram classificados pela importância econômica da substância. Distinguindo assim os metais nobres, metálicos, energéticos, gemas e minerais de pegmatito, substâncias não metálicas (rochas e minerais industriais), rochas ornamentais e água mineral, com destaque absoluto para os minerais não metálicos ou industriais (Santos et al., 2002).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As rochas que se formam no interior da crosta terrestre, sofrem durante a sua vida geológica com várias perturbações, estas que na sua maioria foram formadas em grande profundidade, se encontram aflorando permitindo assim analisar e observar os seus marcadores de deformação, como sigmoides, fraturas de alívio, distensão ou cisalhamento e boudins (Teixeira et al., 2009).

Essas rochas, sejam silicáticas ou carbonáticas nas suas diversas variações, podem ser aproveitadas como rochas ornamentais, veja a figura 5, quando estão a aflorar com baixo grau de fraturamento, podem ser aproveitadas como rochas ornamentais, desde que as mesmas tenham uma coloração e arranjo dos seus minerais, que criem um padrão aceito no mercado, para a sua comercialização.

Figura 5 - Classificação das Rochas Ornamentais quanto a sua mineralogia.



Fonte: Silva, 2020

A extração deste material pode-se utilizar de diferentes configurações, tendo a sua escolha delimitada por suas diferentes litologias e por sua geomorfologia. Por exemplo: a zona

do mármore Carrara, na qual tem o seu relevo montanhoso, se faz realizar a extração do tipo meia encosta ou no topo, similar ao que acontece na região do Espírito Santo no Brasil, como pode ser visto na figura 6. Nas zonas de planície, o impacto sobre a paisagem é menos acentuado, mesmo porque as pedreiras tendem a se desenvolver em profundidade. (Vidal et al., 2013)

Figura 6 - Pedreira de rocha ornamental, realizada no topo de uma montanha.



Fonte: Autor, 2022

Na região de Carrara (Itália) e na Vila Viçosa (Portugal), são utilizados os métodos de lavra a céu aberto e subterrâneo, tendo os critérios de escolha desses métodos associados à tecnologia de corte, demonstrando a possibilidade de diversas soluções que satisfaçam às exigências técnicas nas mais variadas situações para extração destas jazidas com altos relevos. (Vidal et al., 2013)

No Brasil existe uma grande gama de rochas ornamentais, que na sua maioria são extraídas a céu aberto do tipo meia encosta com alturas de bancadas diversas (Vidal et al., 2013). Tendo a região sudeste 60,65% da produção nacional. O estado do Espírito Santo é um dos principais produtores deste material, seguido de Minas Gerais e Ceará, Bahia e Paraíba (Chiodi Filho, 2019). Os estudos de casos ocorreram em duas destas unidades federativas de extração deste material.

A escolha adequada do método de lavra se dá em função da morfologia dos afloramentos, da sua reserva mineral, da análise estrutural da jazida, do seu nível de

fraturamento, da sua localização, e das características intrínsecas do material objeto da exploração. (Vidal et al., 2013)

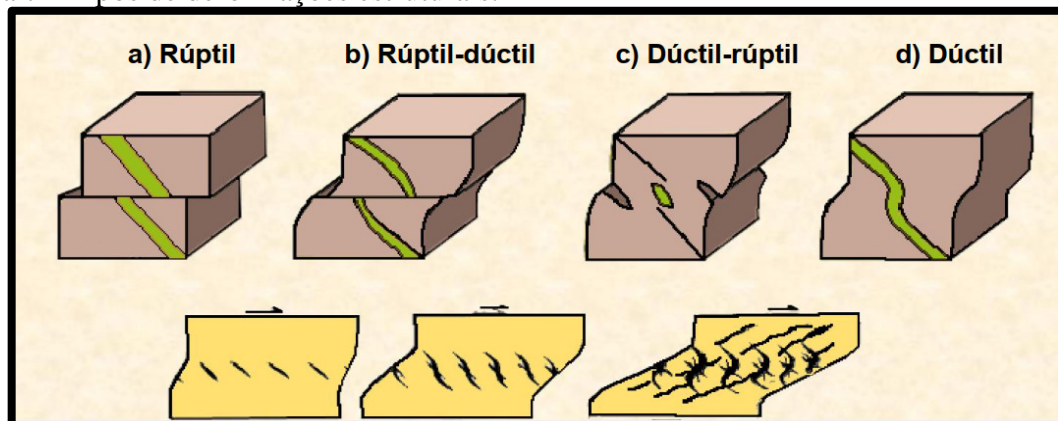
Na extração de rocha ornamental, podem-se utilizar diversos métodos de lavra a céu aberto, com bancadas múltiplas ou simples, porém a sua altura é determinada como baixas, tendo a sua elevação variando de 1,6 a 5 m, já as bancadas de altas variando de 5 a 20 m e as ultra-altas, com a sua altura variando de 20 a mais de 100 m (Vidal et al., 2013) (Sardou Filho, 2013). Pode-se utilizar para a extração deste tipo de material as técnicas de lavra subterrânea, utilizando o método de realce aberto e adaptando este para o de câmaras e salões devido à grande competência do material pétreo (Vidal et al., 2013).

Para se realizar este tipo de trabalho, é necessário o devido conhecimento das estruturas geológicas, bem como as características dos maciços rochosos, para que desta forma, com a sua caracterização, se possa indicar qual o melhor método de lavra a ser utilizado, bem como indicar a direção que o maciço menos sofrerá com os problemas de alívio de tensões.

As estruturas geológicas são configurações geométricas do maciço. A análise destas deformações, diz respeito à mudança na forma, desde os seus estágios iniciais até a sua formação final (Fossen, 2012).

As deformações dúcteis são aquelas que estruturas originalmente contínuas, como estratificações e diques, permanecem como tais após o final deste processo. Esta, ocorre quando as rochas fluem sem fraturas sob influência dos esforços, permanecem resistindo aos esforços, quando solicitadas. Já a do tipo rúptil (frágil), ocorre quando as rochas se quebram ou fraturam-se, diminuindo drasticamente a sua resistência ao esforço solicitado, ver figura 7 e 8 (Fossen, 2012) (Vallejo et al., 2002).

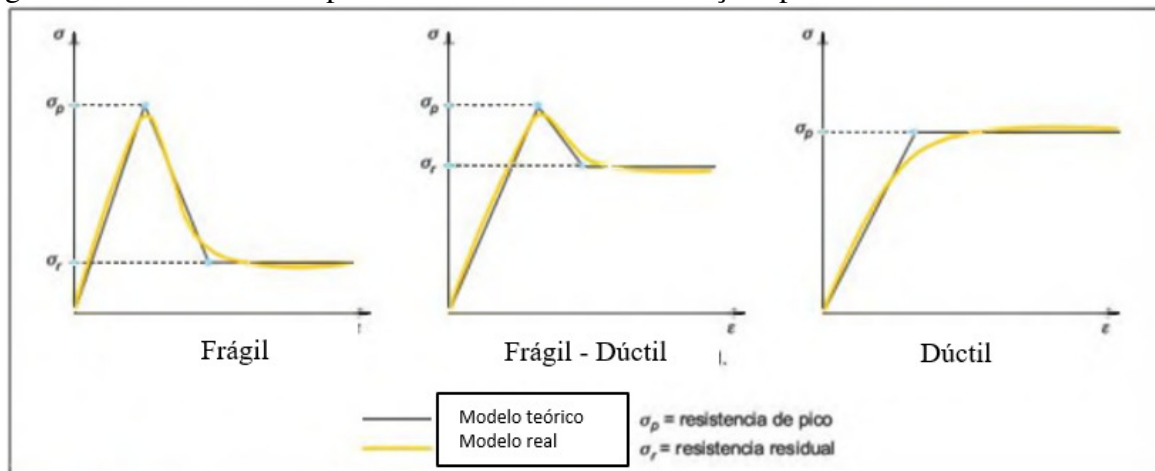
Figura 7 - Tipos de deformações estruturais.



Fonte: Salamuni, 2019

Os esforços rúpteis-dúctil ou vice-versa, são quando as rochas ao serem solicitadas por esforços, realizam um pouco de cada um dos anteriores, elas podem primeiro sofrerem fraturamentos e depois se deformarem, assim como podem sofrer com as deformações e em seguida se romperem, pois os esforços solicitados foram superiores a sua resistência, como vamos observar na figura 7 e 8 (Fossen, 2012) (Vallejo et al., 2002).

Figura 8 - Modelos de comportamento de tensão deformações para os materiais rochosos.



Fonte: Vallejo et al, 2002

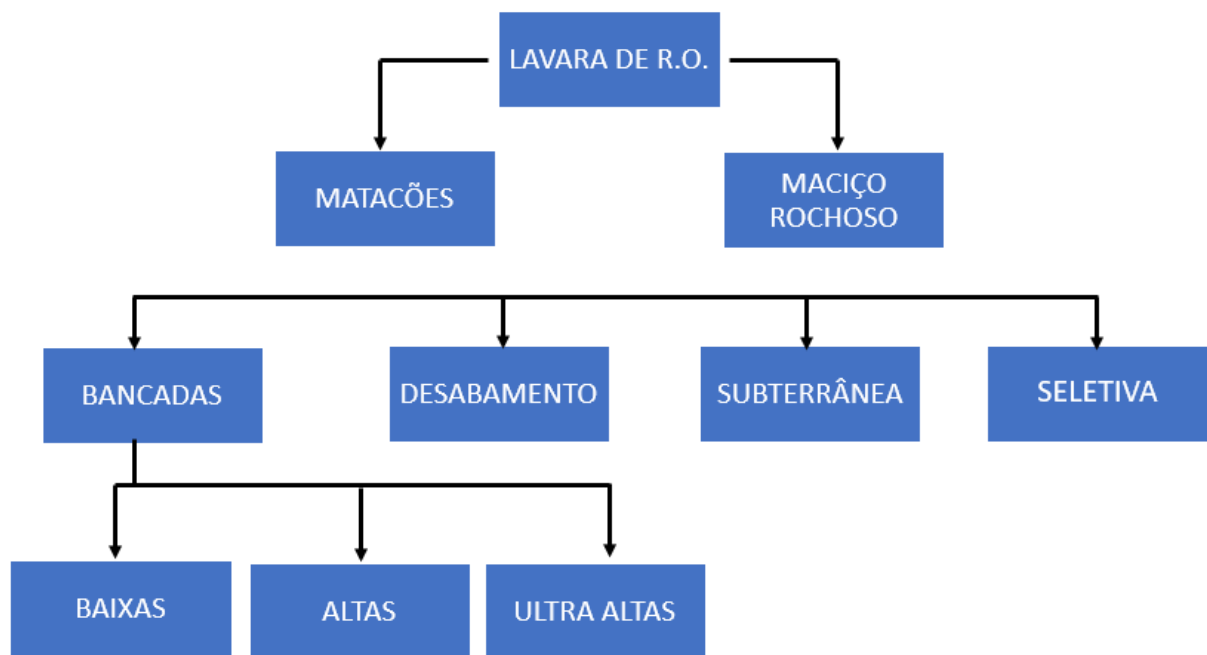
Gráfico acima, mostra o comportamento dos maciços rochosos conforme a resistência da rocha a compressão, sendo possível ver o seu comportamento em relação às tensões sofridas. No primeiro caso o comportamento frágil tem uma grande redução da resistência a tensão, já no segundo caso uma perda menor da resistência e no terceiro caso ele não se rompe continuando a resistir a compressão.

3.1 EXTRAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS

A extração de rochas ornamentais ocorre na sua grande maioria por lavra a céu aberto, podendo também ser extraído por métodos subterrâneos, utilizando-se de várias configurações de altura de bancadas que vão desde valores menores que 5 m a mais de 100 m, sendo contraditório ao se comprar com os métodos convencionais de mineração, mas isso se dá devido à qualidade do maciço rochoso que em suma se comporta como rochas intactas (Silva, 2018).

Para a escolha das alturas dessas bancadas deve-se levar em consideração, as características geotécnicas do maciço rochoso, e assim escolher um dos métodos apresentado na figura 9, após essa seleção temos de operacionalizar a jazida, com a escolha do local de início de extração, vias de acesso e demais etapas de condicionamento de mina (Silva, 2018).

Figura 9 – Métodos de extração de rochas ornamentais.



Fonte: Adaptado de (Roberto, 1998 apud Silva, 2018).

Como as alturas das bancadas seguem na contramão do que é convencional a mineração tradicional, isso se justifica pela análise econômica da extração destas bancadas mais altas, podendo ser demonstrado na tabela 1, que uma bancada ultra-alta com 100 m de altura tem um ganho na rentabilidade da operação aproximadamente 10% maior que em uma com 20 m, essa análise realizada com o mesmo material, sendo esse o motivo que justifica essas elevações (Silva et al., 2019).

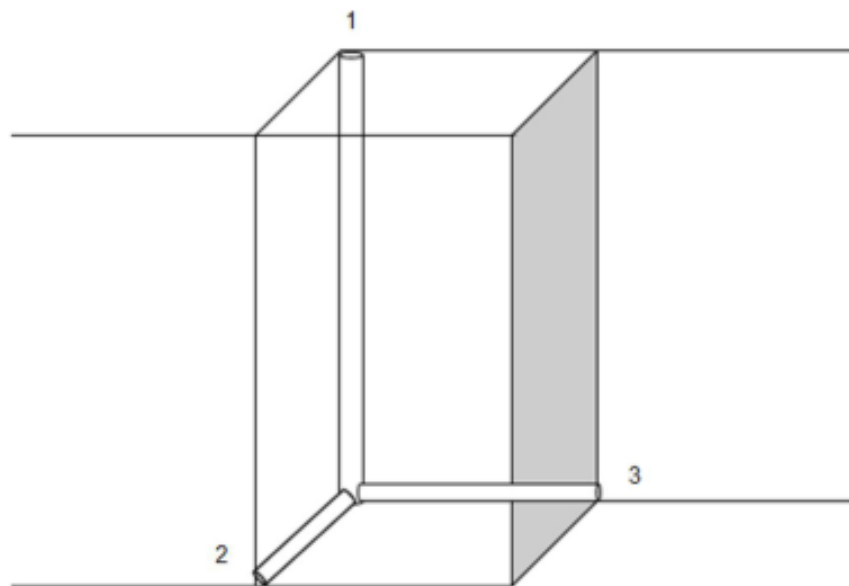
Tabela 1 – Comparativo entre bancadas altas e ultra altas.

Parâmetros:	Bancadas Altas			Bancadas Ultra-Altas		
	C	L	H	C	L	H
Dimensões (metros)	15x	3x	20	20x	20x	100
Tempo total do ciclo (dias)		10			25	
Volume da bancada (m ³)		900			40.000	
Aproveitamento (recuperação)		15%			25%	
Volume final (m ³)		135			10.000	
Quantidade de fio necessário (metros)		75			230	
Custo médio de produção (R\$/m ³)		85,00			125,00	
Custo total por ciclo (R\$)		76.500,00			5.000.000,00	
Preço de venda (R\$/m ³)		650,00			650,00	
Receita média de venda dos blocos (R\$/ciclo)		87.750,00			6.500.000,00	
Lucro por ciclo (R\$/ciclo)		11.250,00			1.500.000,00	
Rentabilidade (%)		12,82%			23,08%	

Fonte: Silva et al., 2019

Como a extração em alturas maiores são mais viáveis economicamente, temos que demonstrar a sua operacionalização de forma segura, sendo necessário a realização de 3 furos, sendo um no topo do talude na direção vertical e mais dois na sua face na direção horizontal, de modo que estes três furos se intersectem como observado na figura 10. Com estes interligados, é possível passar o fio diamantado e isolar a bancada do maciço rochoso, para em seguida derrubá-la e iniciar o seu desmeio (Silva et al., 2019).

Figura 10 – posicionamento da perfuração para extração de rochas ornamentais.



Fonte: Silva et al., 2019

Para se realizar o primeiro furo, deve ser utilizada uma sonda rotativa, com capacidade para atingir grandes profundidade e na furação horizontal martelos de fundo de furo, possibilitando intersectar estes. Essa nem sempre é uma atividade simples, necessitando de retrabalho, pois, nem sempre o encontro destes ocorre na primeira tentativa (Silva, 2018; Silva et al., 2019).

Demonstrada a melhor viabilidade e a aplicação das técnicas de extração de rochas ornamentais se faz necessário para desestabilizar essas bancadas a utilização da técnica denominada ruptura basal em cunha (boca de lobo) como observado na figura 11, essa cunha na base da bancada quando desmontada com auxílio de explosivos, desestabiliza o seu centro de gravidade, fazendo com que a mesma tombe, e só após esse processo se completar pode-se iniciar o seu desmeio em pranchas e em seguida em blocos (Silva, 2018).

Figura 11 – Em vermelho a boca de lobo cortada e em amarelo os furos para realização do desmonte da mesma.



3.2 BANCADAS BAIXAS

Esta técnica utiliza alturas variando de 1,6 a 5,0 m. É um método de baixa produtividade e possibilita a retirada de material pétreo, quase sempre, já com as dimensões do bloco comercial, necessitando de pouco trabalho de desdobramento deste (Menezes, 2005).

Esse método de lavra tem a altura correspondente a uma das dimensões do bloco comercial, normalmente estes são aplicáveis em maciços homogêneos, com poucos defeitos do ponto de vista comercial, sendo perfeitos para jazidas tabular, com grande incidência de fraturas sub-horizontais e pouco espaçadas, sendo estas aproveitadas para gerar um plano natural de separação (Vidal et al., 2013).

Utiliza-se, preferencialmente, essa técnica quando o maciço rochoso apresenta famílias de fraturas naturais ou de alívio de tensão e a sua direção se encontra na horizontal, limitando o tamanho da bancada, como pode ser observado na figura 12 (Menezes, 2005).

Figura 12 - Extração por meio de bancada baixa.



Fonte: Menezes, 2005

A imagem acima nos mostra uma frente de extração de RO, típica de bancadas baixas, onde é possível observar as fraturas sub-horizontais, formando várias camadas (parecendo com casca de cebola), que delimitam a altura da bancada de extração, mas, em contrapartida, está já reduz a necessidade de corte horizontal, pois o material se encontra separado pela descontinuidade.

3.2 BANCADAS ALTAS

A extração por meio de bancadas altas é utilizada pela maior parte das empresas de extração de granito, já que a sua altura pode variar de 5,0 m a 20,0 m como observado na figura 13. Este permite uma maior seletividade e uma boa produtividade, podendo atuar em diversos níveis, com operações mais complexas que as de bancadas baixas. O aprimoramento desta técnica levou as empresas a desmontarem filões com uma dimensão do bloco comercializável, ganhando em produtividade (Menezes, 2005).

Figura 13 - Modelo de bancada alta, para extração de rocha ornamental.



Fonte: Silva et al, 2019

Este modelo de extração tem um avanço lateral que obedece à geometria em formato de L, formando assim os quadros. Estes são desdobrados em volumes secundários, que após serem isolados do maciço são tombados, em seguida são marcados (esquadrejados), no tamanho de blocos comerciais, podendo evoluir em múltiplos níveis de extração (Vidal et al., 2013).

Esta forma possibilita o trabalho em maciços heterogêneos, podendo trabalhar em bancada única ou em múltiplas bancadas. O procedimento é realizado de modo a extrair o maciço rochoso e a perfuração vertical segue até a altura desejada, depois a perfuração horizontal com furos coplanares com o anterior, até que ambos se encontrem. Passando o fio diamantado em seguida primeiro no corte horizontal (levante) e em seguida nos cortes verticais de modo a isolar as bancadas (Silva, 2020).

Esta mesma bancada passa por um corte secundário. O material deste corte (com o nome de filão) tem o tamanho de uma das dimensões do bloco comercial e é derrubado numa cama de amortecimento e, logo após, desdobrado em blocos (Menezes, 2005) (Vidal et al., 2013).

3.3 BANCADAS ULTRA ALTAS

As bancadas ultra-altas são aquelas que tem a sua altura iniciando em 20 m e podem ultrapassar os 100 m. Este método é aplicado após uma análise geotécnica que comprove que o maciço rochoso é competente para suportar estas elevações, já que a sua topografia é mais íngreme, não possibilitando a utilização das outras técnicas, como pode observar na figura 14 (Silva et al., 2019).

Ela é aplicada em maciços com alturas elevadas. O avanço da ocorre de forma ascendente ao nível único, através dos desmontes destas bancadas, tendo essa técnica uma boa seletividade devido a sua topografia (Vidal et al., 2013). Para se tombar estas bancadas, deve-se utilizar uma técnica específica denominada cunha de ruptura basal (Silva, 2020).

Na fase de pesquisa, esta deve ser realizada com critério, seguindo as normas vigentes e coletando o máximo de dados possíveis, para se realizar a caracterização geotécnica do maciço rochoso. Só após a obtenção destes dados, pode se verificar se o mesmo é capaz de suportar a extração de rocha ornamental por este método (Silva et al., 2019).

Figura 14 - Modelo de bancada ultra alta, para extração de rocha ornamental.



Fonte: Silva et al, 2019

Para a utilização desta técnica, deve-se ter atenção as falhas que se encontram no maciço rochoso, já que essas podem comprometer a estabilidade da bancada ultra-altas, pois estas características determinarão o máximo de altura que a bancada poderá alcançar, sem comprometer a sua estabilidade e a segurança das operações (Maior, 2016).

A extração ocorre com as mesmas técnicas utilizadas nas bancadas altas, após a perfuração se encontrar finalizada, se inicia o processo de passagem do fio diamantado, onde se utiliza um cabo guia, que normalmente é o fio de náilon, e com auxílio de ar comprimido, fazendo com que este passe por todo o caminho do furo que se realizara o corte. Só então o fio diamantado é inserido e em seguida inicia-se o processo de separação do maciço com o quadrote que se está extraíndo (Silva, 2020).

3.4 FATOR DE SEGURANÇA

Verificar a estabilidade dos taludes das frentes de lavra de rocha ornamental é de grande importância para as operações, já que a mesma está diretamente ligada à segurança dos

trabalhadores, ao meio ambiente e ao patrimônio da empresa. A estabilidade do maciço rochoso é dada por um fator de segurança (FS), que leva em consideração as forças resistivas e forças cisalhantes do maciço, como pode ser visto na equação 1.

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\Sigma \text{Forças Resistivas}}{\Sigma \text{Forças Cisalhamento}} \quad (1)$$

No caso onde o tipo de ruptura for planar pode-se determinar o FS conforme a equação 2, onde podemos ver a sua geometria descrita na figura 15, facilitando a visualização das forças atuantes neste corpo, como o peso da maça rochosa que poderá deslizar e o ângulo que está forma com a horizontal (Curi, 2017).

$$FS = \frac{(P \cos \theta - U) \times \tan \phi}{P \sin \theta} \quad (2)$$

Onde:

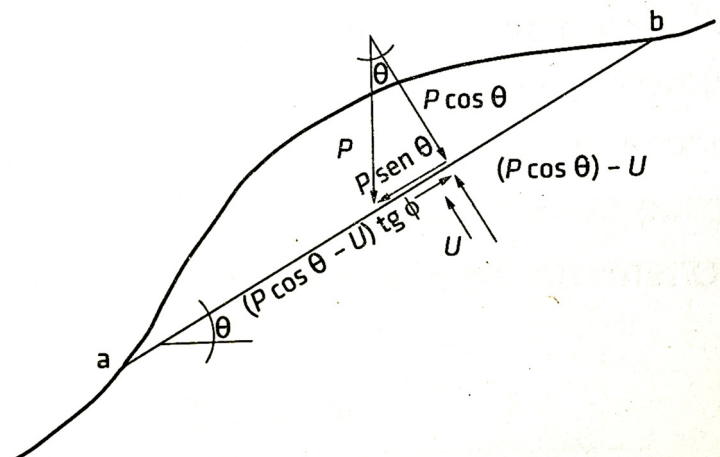
P = Peso do bloco;

θ = Inclinação do plano de ruptura;

U = Subpressão na base do bloco;

ϕ = Ângulo de atrito do contato bloco- plano.

Figura 15 - Forças atuantes em blocos de taludes rochosos.



Fonte: CURI, 2017

Alguns autores, como Read e Stacey (2009) e Wyllie e Mah (2004), entende que este valor de FS deve ter o seu valor variando entre 1,2 a 1,4, para garantir a estabilidade do maciço rochoso na superfície. Segundo Vallejo et al., (2002), a geometria e a geologia impactam diretamente na estabilidade dos taludes, e os valores de segurança para estes taludes devem ser de 1,5 a 2,0 para taludes permanentes e em torno de 1,3 para os temporários.

3.5 ANISOTROPIA

Anisotropia em rochas são os planos de fraquezas (estratificação, laminação, famílias de diaclases), estas alteram as propriedades físico-mecânica, como a sua resistência, deformabilidade e permeabilidade. As tensões também podem gerar uma anisotropia de esforço, associado a este (Vallejo et al., 2002; Marques e Vargas Junior, 2022). Rochas do tipo xisto e siltitos, são sedimentares e anisotrópicas, estas têm os seus valores de resistência a compressão uniaxial simples (UCS) variando de 35 MPa a 80MPa, demonstrando a atenção que se deve ter com este tipo de material (Wyllie e Mah, 2004).

Os valores de UCS devem ser estimados em laboratório, para evitar possíveis erros de estimativa devido à anisotropia da rocha. Estes impactam diretamente na estabilidade dos taludes rochosos (Read e Stacey, 2009).

As rochas que sofreram deformações tectônicas, adquiriram uma característica chamada anisotropia, está altera as propriedades mecânicas das rochas, tendo o seu valor de resistência a compressão uniaxial simples mais baixo, quando medido de forma paralela à estrutura e maior quando perpendicular (Frasca, 2019).

Logo, quando temos rochas com anisotropia, é de fundamental importância analisar em ensaio de compressão uniaxial na direção paralela e perpendicular desta, e ao se obter os resultados devemos levar em consideração o valor mais baixo, para só então utilizá-lo para obter uma geometria e a estabilidade do talude rochoso.

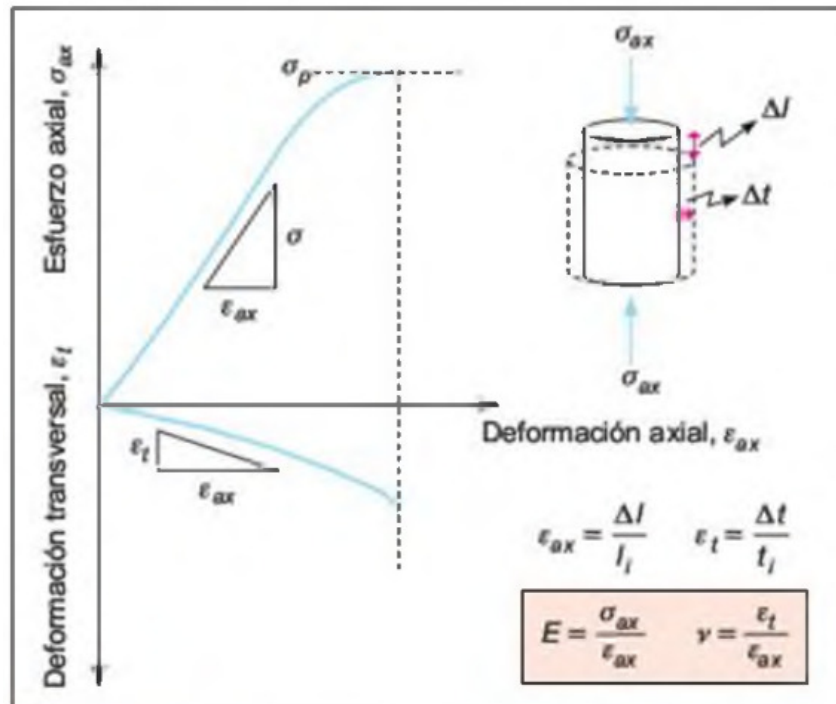
3.6 MÓDULO DE YOUNG

O módulo de elasticidade ou de Young, indica a quantidade de esforço que uma rocha pode suportar, antes de atingir a sua tensão de pico (É a relação entre a tensão e deformação, sofrido pela rocha). Esse valor varia conforme o tipo de material que está a ser analisada. Para obtenção deste, é necessário realizar o ensaio de compressão uniaxial onde deve-se medir os valores de tensão e as deformações sofridas pelo corpo de prova, como observado na figura 16 (Vallejo et al., 2002).

Este é uma relação da tensão e deformação do maciço rochoso, que descreve o seu comportamento. Sendo o modelo mais simples o linear, que utiliza as propriedades elásticas do material. Modelos elástico-plásticos usam parâmetros para limitar a tensão de cisalhamento que aquela região pode suportar (Wyllie e Mah, 2004).

A utilização destes valores é considerada na aplicação dos métodos numéricos, para avaliar a estabilidade dos taludes rochosos, assim como determinar o seu fator de segurança. Com a evolução dos modelos matemáticos e dos *softwares*, tornou mais simples a sua inserção nestes.

Figura 16 – Curvas de Tensão deformação de um ensaio de compressão uniaxial simples, onde se pode obter o módulo de elasticidade.



Fonte: Vallejo et al, 2002

Mas como em muitos casos o ensaio nem sempre é possível de se obter este tipo de resultados, no ano de 1995 o Hoek-Brown, correlacionaram o seu critério com este item, podendo o mesmo ser calculado pela equação 3. Porém, não foram apenas eles que se utilizaram desta modelo, o Bieniawski em 1978, também empregaram esta ferramenta como pode ser visto na equação 4 e o Serafim e Pereira também em 1983, aplicaram o mesmo procedimento como observado na equação 5 (Wyllie e Mah, 2005, Vallejo et al., 2002).

$$Em = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100} 10^{\frac{(GSI-10)}{40}}} \quad (3)$$

Onde:

Em = modulo de elasticidade (GPa);

D = fator de distúrbio;

GSI = Índice de força geológica;

σ_{ci} = Valor da compressão uniaxial simples (MPa).

$$E = 2 \times RMR - 100 \quad (4)$$

Onde:

E = modulo de elasticidade (GPa);

RMR = Classificação de Maciço Rochoso (RMR > 50).

$$E = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (5)$$

Onde:

E = modulo de elasticidade (GPa);

RMR = Classificação de Maciço Rochoso (RMR > 50).

3.7 ÍNDICE DE FORÇA GEOLOGICA - GSI

Segundo Marques e Vargas Junior (2022) e Vallejo et al., (2002), Hoek e Brown reconheceram que os critérios de ruptura que não estivessem relacionados com as observações geológicas, não poderiam ser aplicados de forma prática. Logo eles levando em consideração os modelos já existentes de classificação de maciço, o RMR e o sistema Q, criando assim na década de 90 o seu critério de classificação denominado GSI e ampliando a sua utilização já que esse leva em consideração a qualidade do mesmo em função do seu grau de fraturamento, tamanho de blocos e alteração das suas juntas.

Segundo Hoek e Marinos (2007) o valor do GSI deve ser escolhido pelo usuário, tomando o número que melhor descreve os vários tipos de rochas expostas no seu ambiente geológico. Estes devem ser escolhidos em uma linha que determinará a perturbação naquele ambiente geológico, permitindo que o utilizador faça o seu próprio julgamento sobre quanto reduzir o valor do GSI para explicar a perda de força como observado na figura 17.

Figura 17 - Determinação do índice GSI.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX para rochas fraturadas (Hoek/ Marinos, 2000) A partir da definição do litotipo, da estrutura e das condições da superfície das descontinuidades é possível fornecer estimativas precisas. É melhor considerar uma faixa entre 33 a 37, por exemplo, do que definir um GSI = 35. Note que a estrutura da tabela não se aplica a rupturas sem controle estrutural. Nos locais em que planos estruturais fracos estão presentes em uma orientação desfavorável em relação à face do talude, este irá dominar o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies em mudanças no conteúdo de umidade será reduzida se houver presença de água. Quando trabalhando com rochas muito à direita do diagrama é possível considerar-se condições úmidas. A pressão de água é considerada nas análises em termos de pressões efetivas.		Condições da superfície		Redução da qualidade da superfície →		
Estrutura		Muito boa Superfície muito rugosa e sã	Muito boa Superfície muito rugosa e sã	Regular Superfície suave e moderadamente intemperizada	Pobre Sup. cisalhada, altamente intemperizada com revestimento compacto ou preenchimento ou fragmentos angulares	Muito pobre Superfície cisalhada, <i>slickensided</i> , altamente intemperizada com preenchimento ou revestimento de argila macia
Intacta ou maciça - Rocha intacta ou maciça <i>in situ</i> com poucas descontinuidades muito espaçadas	Diminuição da conexão entre proporções de rocha ↓	90			N/A	N/A
Em blocos - Massas de rocha não perturbada, bem entrelaçada, composta por blocos cúbicos formados pela interseção de três famílias de descontinuidade		80	70			
Muitos blocos - Maciço parcialmente perturbado, entrelaçado, com blocos angulares multifacetados, formados por 4 ou mais famílias de descontinuidades			60	50		
Com blocos/Perturbado/Laminado - Dobrado, com blocos angulares formados pela interseção de muitas descontinuidades. Planos de acamamento ou foliação persistentes				40	30	
Desintegrado - Maciço rochoso intensamente fraturado, blocos angulosos e arredondados, fracamente interligados					20	
Laminado/Cisalhado - Não há blocos, em função do reduzido espaçamento de planos de foliação ou cisalhamento						10
		N/A	N/A			

Fonte: Marques e Vargas Junior, 2022.

Desta forma o valor pode ser obtido tanto qualitativamente, deixando assim os dados a critério da experiência de quem está a realizar a análise, podendo encontrar dados conservadores ou insuficientes, ou utilizar uma técnica quantitativa, possibilitando assim a redução de erros.

Os valores de GSI, quando são maiores que 25, podem ser obtidos de forma quantitativa pela classificação de maciço rochoso (RMR) criada por Bieniawski. Sendo possível determinar este por meio de uma relação entre os dois critérios, como pode-se ser observado na equação 6 a seguir, e implementar este valor ao critério de Hoek e Brow (Read e Stacey, 2009; Vallejo et al., 2002).

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (6)$$

Onde:

GSI = Índice de força geológica;

RMR = Classificação de Maciço Rochoso.

A aplicação deste critério na interpretação de valores de resistência de rochas deve levar em conta, que é válido apenas para maciços isotrópicos, já que o mesmo se baseia em estimações qualitativas e modelos simples, os seus resultados devem ser comparados com outros métodos, sempre que possível, inclusive com os dados de campo, para avaliar se os mesmos estão coerentes (Vallejo et al., 2002).



3.8 FATOR DE DANO

Segundo Hoek et al. (2002), o D é um fator que depende do grau de perturbação sofrido pelo maciço, seja pelo desmonte de rochas com explosivos ou pelo alívio de tensões causadas pela escavação. Esse deve ser zero para rochas in situ intactas ou 1 quando o mesmo se encontra bastante perturbado, como podemos observar na tabela 2. Esse critério deve ser utilizado com cuidado.

Este valor é utilizado no critério de Hoek e Brown, para obter os resultados de m e s , e quando estiver mais próximo de zero, menor será a penalização dos parâmetros do maciço,

mas se o mesmo se aproxima de 1, maior será sua penalização. Quando estes índices são aplicados na equação, os seus resultados para σ_1 são melhores ou piores.

Tabela 2 – A seguir, podemos verificar como obter os valores do fator de distúrbio em bancadas, desenvolvido por Hoek.

Aparência do Maciço rochoso	Descrição do Maciço Rochoso	Sugestão dos Valores de D
	A detonação em pequena escala em encostas de engenharia resulta em danos modestos ao maciço rochoso, particularmente se a detonação controlada for usada como mostrado na figura. No entanto, o alívio da tensão resulta em alguns distúrbios.	D = 0,7 Detonação boa D = 1,0 Detonação ruim
	Encostas de mina a céu aberto muito grandes sofrem perturbações significativa devido ao desmonte de produção pesada e também devido ao alívio de tensão da remoção de estéril.	D = 1,0 Desmonte de produção
	Em algumas rochas mais macias, a escavação pode ser realizada de forma mecânica e o grau de danos às encostas são menores.	D = 0,7 Escavação mecânica

Fonte: Willy e Mah, 2004.

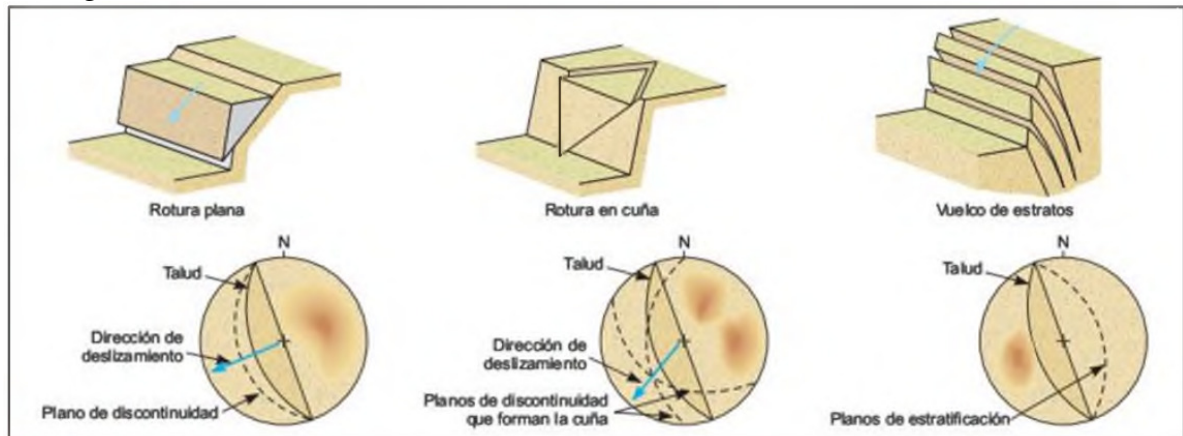
Na primeira linha da tabela temos um desmonte com explosivo em bancada simples, onde a qualidade do mesmo pode ser ruim ou boa alterando o valor de D. Já para a imagem que se encontra na segunda linha, temos uma mina com bancadas múltiplas podendo o valor de distúrbio ser o mais alto, devido à execução das detonações para produção ou ser de 0,7 quando nestas bancadas são trabalhadas com a extração mecânica.

3.9 TIPOS DE RUPTURAS

As rupturas são condicionadas pelo grau de faturação de um maciço, a sua orientação e distribuição ao longo do maciço. A estabilidade está condicionada aos parâmetros de resistência

da rocha, além da resistência das descontinuidades. Sendo esses modelos mais frequentes são as planares, cunhas e tombamento flexural conforme observado na figura 18 (Vallejo et al., 2002).

Figura 18 - Tipos de rupturas mais comuns em maciços rochosos e as suas leituras estereográficas.



Fonte: Vallejo et al., 2002

Cada uma destas rupturas está associada a diferentes estruturas geológicas, esses padrões têm que serem identificados quando realizados a sua análise estereográfica. A análise cinemática é de suma importância para identificarmos esses riscos e prevermos projetos de taludes estáveis (Wyllie e Mah, 2004).

As fraturas do tipo cisalhamento são as que tem movimento relativo, paralelo entre elas. Essas, apresentam deslizamento paralelo no seu plano, desenvolvendo-se tipicamente com um ângulo de 20° a 30° em relação a σ_1 . Estas, tendem a se formar em pares conjugados, cuja bissetriz é σ_1 , podendo-se serem formadas próximo à transição rúptil-dúctil (Fossen, 2012).

Fraturas extensionais são aquelas que se apresentam na direção perpendicular às faces. Ocorrem formando um ângulo de 90° com a tensão σ_3 . Já as rupturas de cisalhamento são oblíquas a σ_3 , num ângulo que depende principalmente das propriedades da rocha e do estado de esforços (Fossen, 2012).

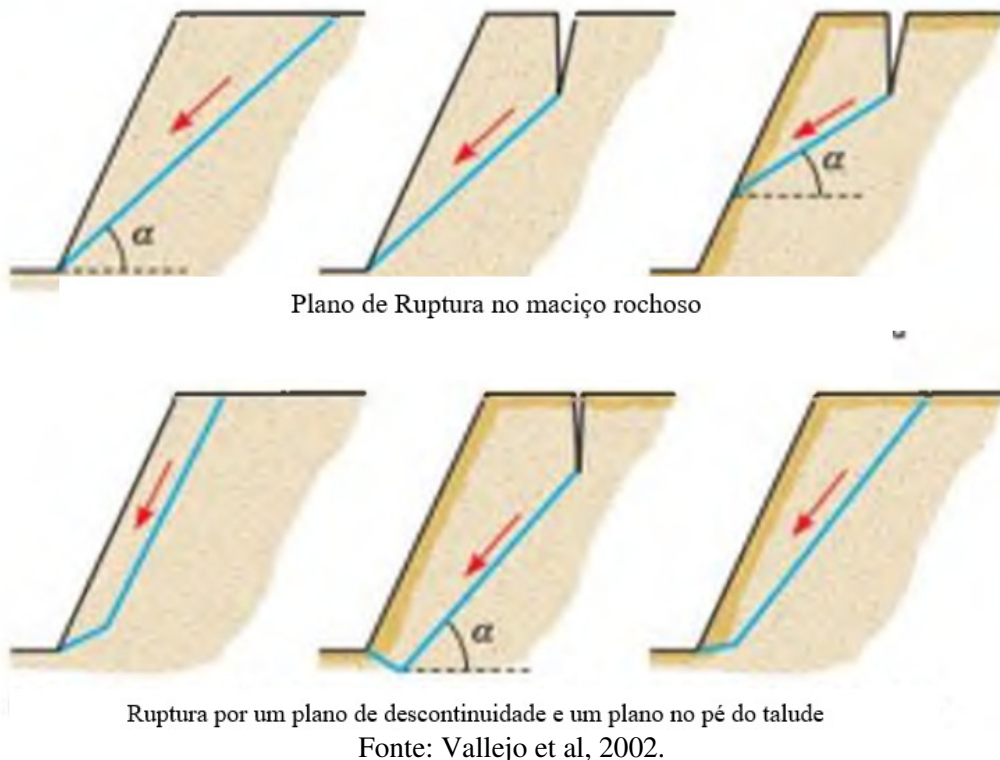
Grupos de pequenas descontinuidades, em áreas limitadas (um afloramento ou uma pedreira) podem ser analisados para a reconstrução do campo local de Paleo esforços. Os eixos de esforços máximos principais estão na bissetriz aguda do ângulo, entre as falhas conjugadas (Fossen, 2012).

3.9.1. Planar

As rupturas planas ocorrem numa superfície pré-existente, que pode ser a estratificação ou as suas descontinuidades. Tem como condição básica a presença destas a favor da direção do talude. Sendo o ângulo deste maior que o da descontinuidade (Vallejo et al., 2002).

Esta falha ocorre raramente em taludes rochosos, porque as condições geométricas para a mesma são muito difíceis, porém não devemos ignorá-las, porém se essa ocorre, o seu plano de deslizamento deve ser paralelo ou quase paralelo (aproximadamente 20°) para a face do declive como pode ser observado na figura 19. O mergulho do plano deve ser menor que o mergulho da inclinação (Wyllie e Mah, 2004).

Figura 19 - Tipos de rupturas planares, em maciços rochosos.

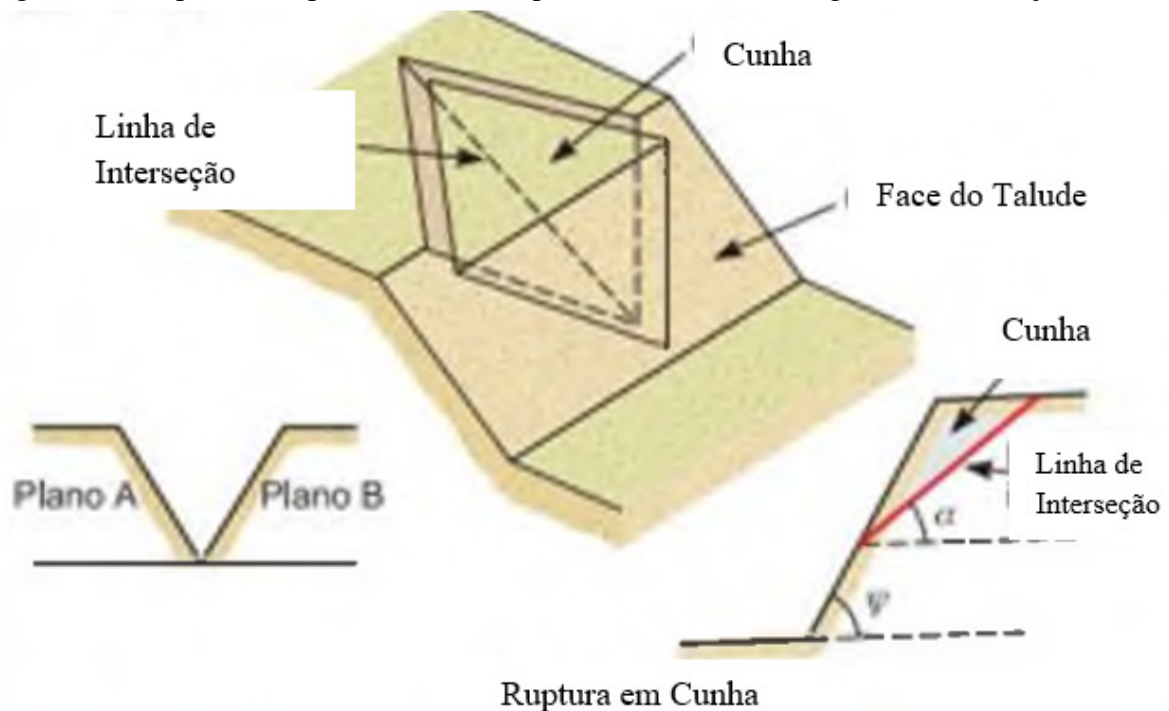


O mergulho do plano de deslizamento deve ser maior do que o ângulo de fricção da rocha. A extremidade superior da superfície cruza ou termina numa quebra de tensão. Superfícies que não forneçam resistência devem estar presentes no maciço rochoso em questão (Wyllie e Mah, 2004).

3.9.2. Cunha

A ruptura do tipo cunha ocorre quando o bloco deslizante se encontra com tal forma como observado na figura 20, essa ocorre devido à interseção de dois planos, o seu escorregamento se dá quando o ângulo da face for maior que o da intercessão das descontinuidades que é maior que o ângulo de fricção da rocha, dependendo de famílias de descontinuidades diferentes na mesma região do maciço (Vallejo et al., 2002).

Figura 20 - Ruptura do tipo cunha, onde é possível verificar os ângulos de interseção.



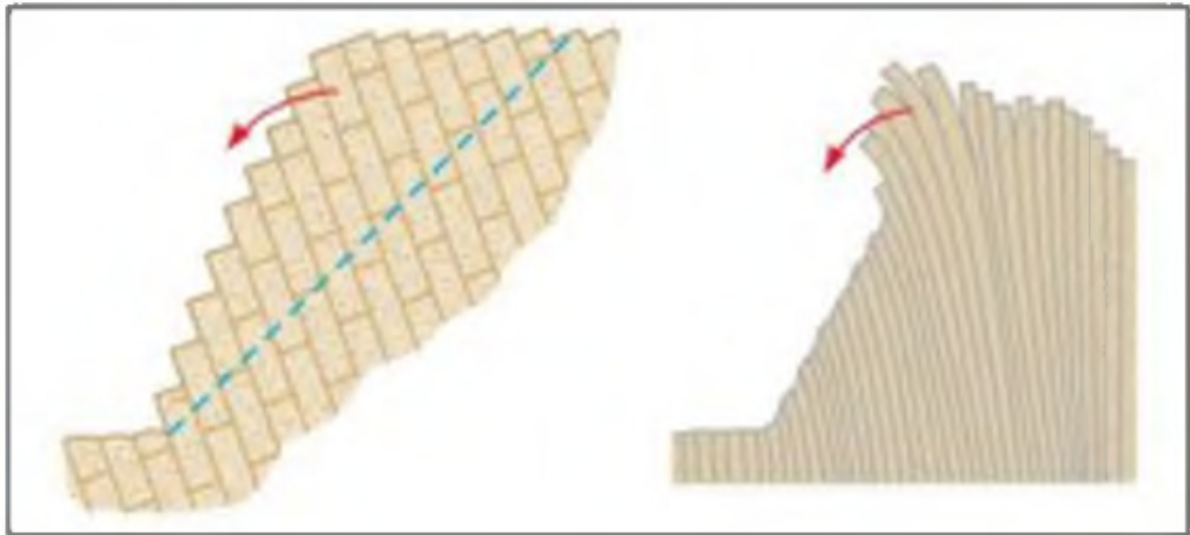
Fonte: Vallejo et al, 2002.

Este tipo de falha pode ocorrer numa gama muito mais ampla de condições geológicas. Com uma análise estereográfica é possível observar se a mesma existe, e a direção do deslizamento. Ainda é possível observar se ela pode deslizar, apesar de não informar o seu fator de segurança (Wyllie e Mah, 2004).

3.9.3. Flexural

A ruptura do tipo flexural ocorre em maciços rochosos, onde a direção dos estratos presentes é contrária à direção do talude e os mesmos estão paralelos ou subparalelos entre si, como observado na figura 21. De modo geral, estes aparecem fraturados, em blocos a favor do sistema de descontinuidades ortogonais entre si. Ela sofre com movimentos de rotação e a estabilidade do mesmo é condicionada à resistência ao deslizamento (Vallejo et al., 2002).

Figura 21 - Modelo de ruptura flexural.

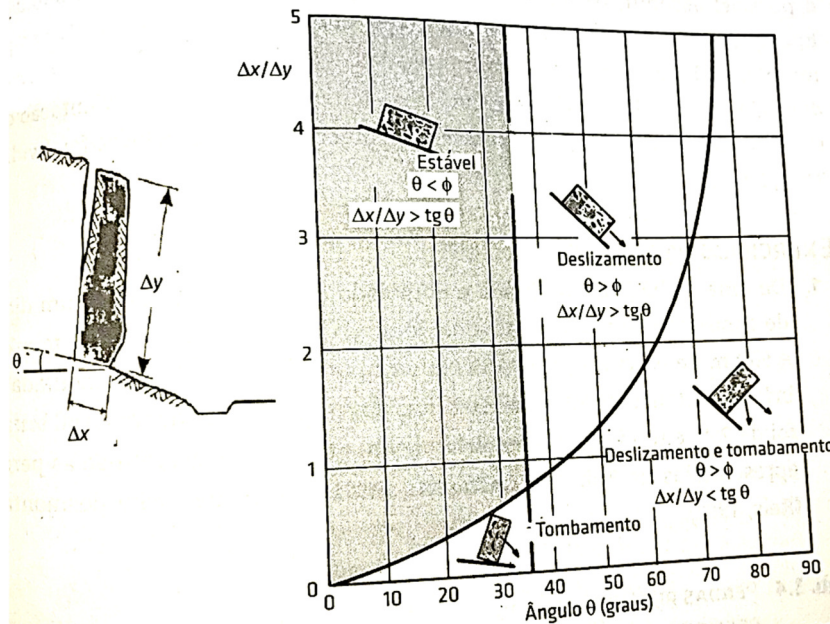


Fonte: Vallejo et al, 2002.

Para realizar a análise da estabilidade deste tipo de ruptura, se deve primeiramente realizar uma análise cinemática das estruturas encontradas no maciço, podendo assim identificar condições de instabilidade do mesmo. Deve-se analisar a forma do bloco e o seu centro de massa, como apresentado na figura 22, podendo assim verificar se o mesmo se encontra em equilíbrio ou tem risco de tombar (Wyllie e Mah, 2004).

A ruptura flexural (bending) ocorre se as forças agirem em alto ângulo por camada, de modo distinto das dobras ativas (flambagem), onde a força principal age de modo paralelo a estas. Esse tipo de ruptura ocorre quando os esforços atuantes envolvem mais de um mecanismo de deformação (Fossen, 2012).

Figura 22 - Ábaco de avaliação das condições de deslizamentos ou tombamento de blocos, sobre planos inclinados.



Fonte: Curi, 2017.

O deslizamento flexural corresponde à movimentação das camadas ao longo das suas interfaces, durante o dobramento. Estrias de atrito em regiões pouco competentes dobradas e de espessura constante são indicativas deste tipo de movimento (Fossen, 2012).

3.10 CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇO ROCHOSO - RMR

Criado por Bieniawski nos anos de 1974, 1976 e 1979, e em seguida reformulado em 1989, para promover um índice de qualidade geotécnica as rochas, tendo este uma escala que varia de 0 a 100, sendo subdividido em cinco classes, que vai desde o ótimo, até o muito ruim quando se aproxima de zero. Este leva em consideração os valores de UCS, RQD, espaçamento das discontinuidades, condições das discontinuidades, condição de águas e orientação das juntas (Read e Stacey, 2009; Vallejo et al., 2002).

Para que este método de classificação maciço resistisse ao tempo, ele tem que ser intercambiável, mas os seus princípios têm que ser seguidos. Com o avanço da tecnologia e dos anos, vários métodos foram adaptados a partir do RMR, inclusive para melhorar a sua aplicabilidade na mineração (Bieniawski, 1989).

A sua aplicação se torna possível, quando se divide o maciço rochoso em zonas que possuam características geológicas mais similares possíveis, só após esta setorização iniciamos a coleta de dados referentes aos itens levados em consideração no critério de Bieniawski, ao se obter os respectivos resultados pode se calcular os valores geotécnicos em cada região (Vallejo et al., 2002).

A alocação destes valores na tabela de pesos criada por Bieniawski, permite observar quais os parâmetros não contribuem de forma igual para a classificação dos maciços rochosos, sendo o valor de RMR obtido ao ser aplicado na tabela 3 (Vallejo et al., 2002; Brady e Brown, 2005).

Tabela 3 - Sistema de classificação RMR.

PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS								
Parâmetros		Valores						
1	Res. Da rocha Intacta (UCS)(Mpa)	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
	Pesos	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50		< 25	
	Pesos	20	17	13	8		3	
3	Espaçamento das descontinuidades (m)	>2	0,6 – 2	0,2 – 0,6	0,06 – 0,2		<0,06	
	Pesos	20	15	10	8		5	
4	Condição de descontinuidades	Sup. Muito Rugosa, não persistente, fechada, sem alteração	Sup. Pouco rugosa, abertura <1mm e parede levemente alteradas	Sup. Pouco rugosa, abertura <1mm e parede muito alteradas	Sup. Estriada preenchimento <5mm ou abertura de 1 a 5mm persistente		Preenchimento >5mm ou abertura >5mm persistente	
	Pesos	30	25	20	10		0	
5	Condição de água	Seco	Úmido	Molhado	Gotejando		Fluxo Abundante	
	Pesos	15	10	7	4		0	
6	Direção e mergulho Taludes	Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável		Muito desfavorável	
	Pesos	0	-5	-25	-50		-	

Fonte: adaptado Bieniawski, 1989.

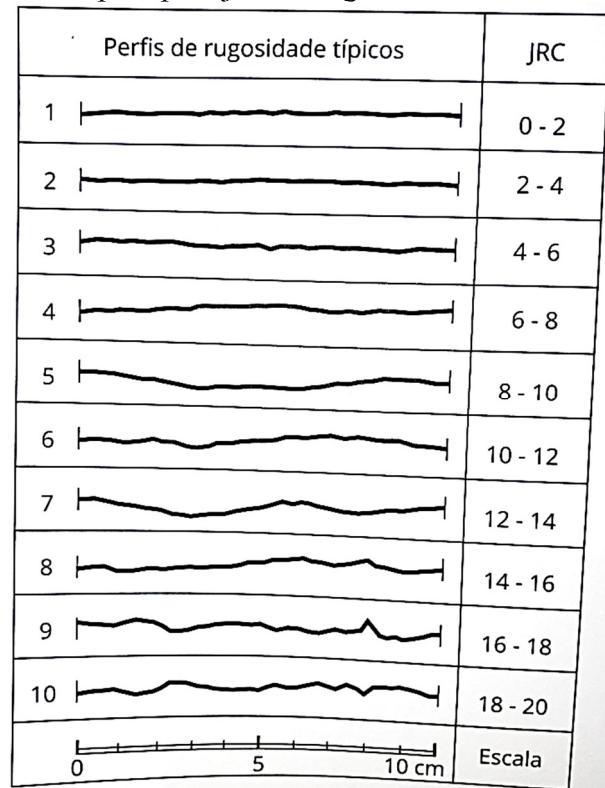
Em relação ao item 4 do critério, temos que observar o que é a rugosidade e como medi-la, já que está é uma componente importante na resistência ao cisalhamento das descontinuidades, assim como a resistência de sua parede, pois a rugosidade pode ser destruída

devido à tensão de cisalhamento, sendo o intemperismo o principal causador de sua diminuição, a coleta deste resulta é realizada com auxílio do método de Barton (Marques e Vargas Junior, 2022).

Os primeiros trabalhos do Barton, na tentativa de quantificar os valores das descontinuidades, datam da década de 70, e este continuou seus estudos unindo-se com outros pesquisadores para desenvolver seu critério, sendo criado assim uma equação empírica e aperfeiçoada na década de 90 (Marques e Vargas Junior, 2022).

Com esta equação eles estudaram o coeficiente de rugosidade da junta – JRC, sendo este obtido comparando os perfis das juntas como observado na figura 23, tendo seu valor variando de 0 a 20. Assim como a resistência à compressão da junta – JCS, sendo esse de grande importância, pois quanto maior essa resistência mais difícil será o cisalhamento sobre a mesma e o seu valor pode ser obtido com a utilização do martelo de Schmidt ou pela equação 7 (Marques e Vargas Junior, 2022).

Figura 23 – Perfil de rugosidade típico para juntas, segundo o critério de Barton Bandis.



Fonte: Marques e Vargas Junior, 2022.

$$JCS = 0,25 \times C0$$

(7)

Onde:

C_0 = Resistência a compressão uniaxial.

O critério de Bieniawski, leva em consideração vários parâmetros fáceis de se obter, mas ao depender da região analisada pode-se levar muito tempo para se classificar o maciço em questão. Logo após serem aplicados na respectiva tabela, somam-se todos os valores, e pode utilizar a tabela 4 para obter a classificação dos maciços rochosos RMR. (Vallejo et al., 2002; Brady e Brown, 2005).

Tabela 4 - Classes de maciço rochoso RMR (1989).

Peso Global	100-81	80-61	60-41	40-21	<21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Maciço rochoso muito bom	Maciço rochoso bom	Maciço rochoso razoável	Maciço rochoso fraco	Maciço rochoso muito fraco
Tempo médio para aguentar sem suporte	20 anos para 15m de vão	1 ano para 10m de vão	1 semana para 5m de vão	10 horas para 2,5m de vão	30 minutos para 1m de vão
Coesão da massa rochosa (KPa)	>400	300-400	200-300	100-200	< 100
Ângulo de atrito da massa rochosa (°)	>45	35-45	25-35	15-25	< 15

Fonte: Bieniawski, 1989.

Quando o maciço já se encontra classificado, é possível ainda saber se o talude se encontra estável e por quanto tempo ele se encontra em equilíbrio, assim como a coesão do maciço rochoso e o ângulo de atrito. Todos esses parâmetros são de suma importância para avaliarmos a estabilidade de qualquer maciço rochoso, o qual é o foco deste trabalho, garantindo a segurança das pessoas.

3.11 MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

O método de equilíbrio limite (MEL), se baseia em uma análise estática, não levando em conta as deformações ou distribuição de tensões, supondo assim, que estas serão uniformes em todo o corpo analisado. Seus modelos de falhas são muito simples. Este, divide o maciço em um número de n pequenas lamelas, onde cada uma delas é afetada por um sistema geral de forças (Wyllie e Mah, 2004).

Este é um dos métodos mais utilizados para analisar o equilíbrio de um bloco potencialmente instável, está se baseia na observação da superfície de ruptura, no critério de Mohr-Coulomb e na definição do coeficiente de segurança. Seguindo as suas condições é possível determinar o FS, já abordado no item 3.4. Este critério analisa as diversas superfícies de ruptura, cineticamente possível, até encontrar a superfície de segurança com menor valor (Vallejo et al., 2002).

A estabilidade dos taludes rochosos sofre influência direta da resistência ao cisalhamento. Para que este tipo de metodologia seja aplicado, se utiliza o critério de Mohr – Coulomb, em qual a resistência ao cisalhamento é expressa em função da coesão (c) e do ângulo de atrito (φ), como observado na equação 8. (Wyllie e Mah, 2004)

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (8)$$

Onde:

τ = Tensão cisalhante

c = coesão

σ = Tensão normal

φ = ângulo de fricção

A equação 1, na seção 3.4, demonstra a forma de obtenção do valor de FS, onde o bloco deslizará, quando o seu ângulo de deslizamento é igual ao ângulo de atrito da superfície, e para se obter a estabilidade independe do tamanho do bloco que está sofrendo tal movimento. Ou seja, este se encontra em equilíbrio limite, quando as forças motrizes são exatamente iguais às

forças resistentes, obtendo assim o valor do fator de segurança igual ou maior que 1,0 (Wyllie e Mah, 2004).

Existem diversas técnicas para o cálculo do FS utilizando o MEL, mas ao se utilizar os métodos menos complexos, esses são mais adequados para análise de solos. Podendo ser divididos em dois tipos, a primeira analisa o bloco como massa total, sendo válido para materiais homogêneos e eles comparam as forças em um ponto da superfície de ruptura (Vallejo et al., 2002).

O segundo divide o corpo em lamelas verticais, este podendo ser aplicado para materiais heterogêneos, analisando as forças em cada lamela e analisando essas em vários pontos do maciço rochoso, devendo utilizar a técnicas desenvolvidas por Bishop e Jambu, sendo o primeiro método para superfícies curvas e o segundo para superfícies curvas, planas e poligonais (Vallejo et al., 2002).

3.12 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos foram desenvolvidos para simular e validar as mudanças de tensões sofridas nos projetos de escavação mineral, de modo a garantir que estes ficarão estáveis durante toda a vida útil da mina. Quando se escava um material que se encontra confinado, é natural que se obtenha um rearranjo na distribuição das tensões, e estas, influenciam diretamente na deformação e deslocamento do maciço rochoso (Brady e Brown, 2005).

Escolher entre métodos contínuos ou discretos, deve levar em conta a escala do problema e a geometria do sistema de fratura. A abordagem contínua pode ser usada em rochas com baixo grau de fraturamento e sua abertura não é significativa. Já o modelo discreto é mais adequado para rochas moderadamente fraturadas, ou onde o deslocamento de grandes blocos individuais é possível (Jing e Hudson, 2002).

As soluções mais complexas podem utilizar os métodos computacionais, onde estes modelos de análises se dividem em duas categorias: os que utilizam métodos diferenciais e os que se utilizam de métodos integrais. Estes, são divididos em quatro técnicas (Brady e Brown, 2005).

1. Método dos elementos de bordas (BEM);

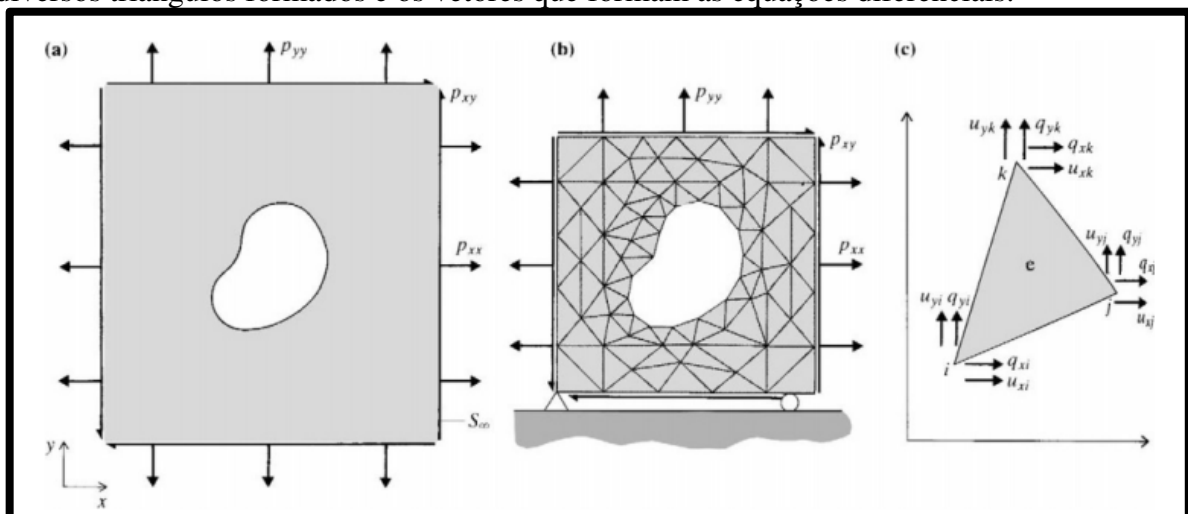
2. Método de elementos finitos (FEM);
3. Método dos elementos distintos (DEM);
4. Métodos das diferenças finitas (FDM).

O FDM, utiliza a discretização das equações diferenciais parciais, onde ele substitui as derivadas parciais em pontos de grade vizinhos. Esse sistema de grade é conveniente, pois geram valores das funções com intervalos pequenos o suficiente entre eles, de modo que os erros sejam tão pequenos que se tornam aceitáveis (Jing e Hudson, 2002).

Já o FEM é um dos mais utilizados dos métodos numéricos em ciência e engenharia, desde sua origem em 1960, orientado para soluções de problemas em mecânica de rochas, pois ele tem flexibilidade para o tratamento de materiais heterogêneos e deformabilidade não linear, dentre outros. Esse método tem como limite a utilização de inúmeras fraturas, que prejudica a análise de sua matriz rochosa (Jing e Hudson, 2002).

A base deste método é a definição de um domínio, no entorno de um problema de escavação, onde este é dividido em um conjunto de elementos discretos e interativos. Ele é dividido em um conjunto de elementos triangulares, e cada nó gera uma equação nos três eixos, como pode ser observado na figura 24. O FEM busca determinar o estado total das forças e os deslocamentos induzidos pelas escavações (Brady e Brown, 2005).

Figura 24 - Modelo de elementos finitos, que após a discretização é possível observar os diversos triângulos formados e os vetores que formam as equações diferenciais.



Fonte: Brady e Brown, 2005.

O BEM inicialmente busca uma solução global, utilizando o teorema de Betti e a identidade Somigliana's. Tendo suas aplicações na área de tensões e deformações em geral para escavações subterrâneas, estrutura de solos e fluxo de água subterrâneo. Sendo sua abordagem mais adequada para simulação de problemas de fraturas, sendo também adequado para simulações de tensões (Jing e Hudson, 2002).

Já no DEM os domínios de interesse são tratados como um conjunto rígido ou de blocos deformáveis. Sendo o método baseado na formulação e solução de equações de movimento. Sendo amplamente utilizado em mecânica de rochas, solos, fluidos, análise estrutural e materiais granulares, sendo baseado nos métodos contínuos (Jing e Hudson, 2002).

3.13 CRITÉRIO DE HOEK BROWN

Na década de 80, Hoek e Brown desenvolveram o seu critério como alternativa, para conseguir determinar as forças atuantes nos maciços rochosos, já que poderiam ser utilizados em rocha anisotrópicas e fraturadas, esse método foi desenvolvido de acordo com análises empíricas e levou em consideração a resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb além de outros, este é o único que leva em consideração a resistência da rocha intacta e do maciço rochoso (Wyllie e Mah, 2004; Marques e Vargas Junior, 2022).

O critério de Hoek e Brown é derivado das pesquisas de ambos os autores sobre falhas em maciços rochosos e o modelo de comportamento destes maciços. As teorias desenvolvidas por Griffith em 1924 e McClintock e Walsh em 1962, serviram como base para o critério de falha não linear desenvolvido por Hoek e Brown em 1980, e após 38 anos de experiência, no ano de 2001, esta foi atualizada para se obter melhores resultados (Hoek e Brown, 2019).

Este método, desenvolvido por Hoek e Brown, introduziu-se o critério de falha para se analisar os valores das forças em maciços rochosos, escolhendo o método do RMR, para auxiliar na inserção destes valores conforme as observações geológicas. Devido à falta de alternativas adequadas, esse critério foi difundido na comunidade de mecânica de rochas, e com o passar dos anos e novas observações este foi passando por atualizações (Wyllie e Mah, 2004).

Este fornece bons resultados para determinados tipos de rochas frágeis, como o granito, gnaisse, gabros, quartzodioritos e outros, porém se tem uma maior dispersão nos resultados

quando se analisam rochas do tipo dúcteis, como calcários e argilitos (Marques e Vargas Junior, 2022).

Como o critério foi desenvolvido de forma não linear, se tornou mais adequado para se avaliar as forças em matrizes rochosas, válido para avaliar rochas isotrópicas em condições triaxiais (Vallejo et al., 2002). Este critério, associado ao GSI, ganhou ampla aceitação como ferramenta para estimar as resistências e deformações dos maciços rochosos (Hoek e Brown, 2019).

O critério generalizado de Hoek e Brown para estimar as tensões em maciços rochosos, é expresso pelas equações 9, 10, 11 e 12:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(mb \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (9)$$

Onde:

σ_1 = Tensão principal maior;

σ_3 = Tensões principais menor;

σ_{ci} = Resistência à compressão simples;

m_b , S e a = são constantes do maciço rochoso.

Obtidos pelas equações a seguir:

$$m_b = m_i e^{\left[\frac{(GSI-100)}{(28-14D)} \right]} \quad (10)$$

$$S = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)} \quad (11)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (12)$$

O valor de m_i é uma constante do material que se encontra tabelado ou pode ser obtido por meio de ensaios em laboratório, como observado na equação 13, para o tipo de material encontrado. O valor de D é o valor de dano, que também se encontra tabelado e pode variar de 0 a 1 como já observado no item 3.8 deste capítulo.

$$m_i = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{\sigma_{ci}(\sigma_3 + \sigma_{ci})} \quad (13)$$

Onde:

σ_1 = Tensão principal maior;

σ_3 = Tensões principais menor;

σ_{ci} = Resistência à compressão simples;

m_i = constante do material rochoso.

De posse destas equações podemos obter todas as componentes do critério de ruptura do Hoek e Brown, garantindo sua aplicação com bons resultados para as rochas graníticas do tipo ornamental, utilizadas para este trabalho.

3.14 TENSÕES

Sabendo-se que tensão é uma força em relação à unidade de área, sendo estas direta ou inversamente proporcionais, como pode ser observada na equação 14. Para uma melhor análise da redistribuição das tensões residuais, ao se analisar esta equação é possível observar que quanto maior a área, menor será a tensão.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (14)$$

Onde:

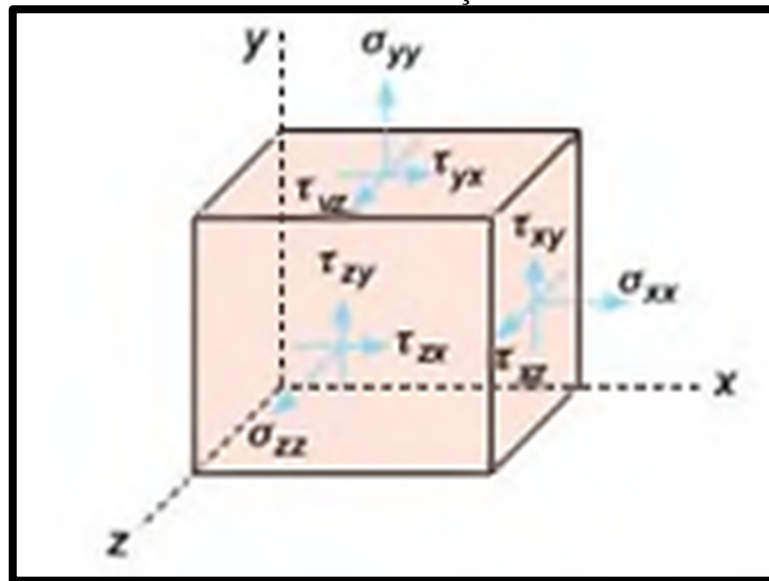
τ = Tensão;

F = força;

A = Área.

A tensão é uma força com direção e magnitude (vetorial). Estas podem ser decompostas em três componentes ortogonais, uma normal e duas paralelas à face do cubo, como vemos na figura 25. As tensões normais são aquelas que suas componentes são iguais, enquanto as que têm componentes diferentes são as tensões cisalhantes. Desta forma, as tensões atuantes em um maciço são decompostas obtendo-se três normais e seis cisalhantes (Zerfass e Chemale Junior, 2011).

Figura 25 - Modelo de tensões atuantes em um maciço rochoso.



Fonte: Vallejo et al., 2002

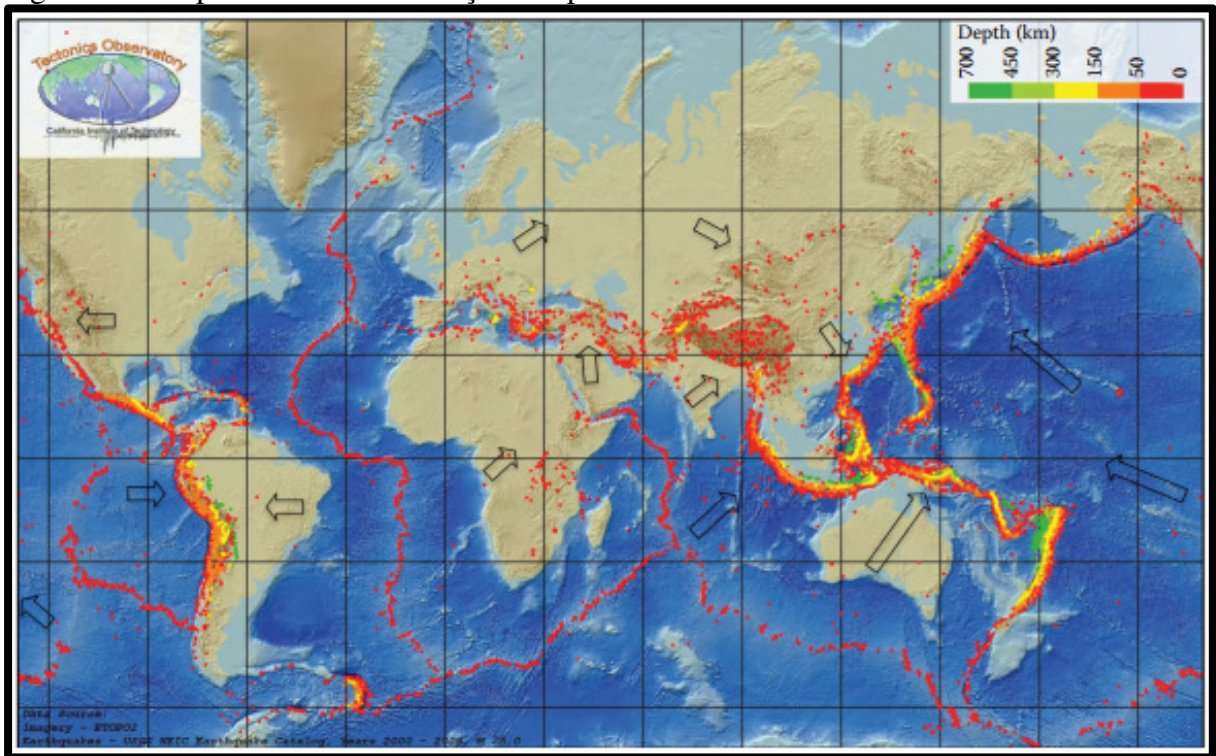
A aplicação de novas forças modifica a magnitude ou a distribuição das preexistentes, estas modificam o estado de equilíbrio do maciço rochoso e produzem uma série de efeitos internos, como a deformação ou os esforços sofridos por essas. O estado de um sistema de tensões é caracterizado, pela posição de coordenadas, as forças que atuam entre as partes do sistema e a velocidade com que elas mudam de posição (Vallejo et al., 2002).

Na imagem é possível ver os três eixos de coordenadas x, y e z, e em cada plano que as forças são aplicadas, existe uma tensão normal aplicada na mesma intensidade, só que em direção contrária à força aplicada, formando os pares de forças para mantê-la em equilíbrio.

Entretanto, os dois tensores cisalhantes paralelos à mesma face se subtraem, restando apenas três, ficando assim apenas seis componentes independentes que descrevem o estado de tensão de um corpo, estas componentes são três normais e três cisalhantes, simbolizados respectivamente como σ e τ . Estas tensões são provenientes da força da gravidade ou da

movimentação das placas tectônicas, como pode ser observado na figura 26 (Zerfass e Chemale Junior, 2011).

Figura 26 - Mapa com a movimentação das placas tectônicas.



Fonte: Hencher, 2015

Na imagem podemos ver o mapa do mundo com suas respectivas placas tectônicas, onde as setas indicam a direção de seus movimentos, em seguida é possível observar em vermelho os locais que sofrem com compressão e distensão globais na formação de maciços rochosos.

Sendo assim fundamental o conhecimento do estado das tensões no entorno das rochas a que se pretende trabalhar, pois após se escavar suas forças serão alteradas e conhecê-las é fundamental para manter a estabilização de qualquer escavação. Os maciços rochosos mais rígidos iram suportar um nível de tensão mais elevado, enquanto os que têm menos qualidade resistiram a forças menores (Curi, 2017).

3.15 DIREÇÃO E MERGULHO

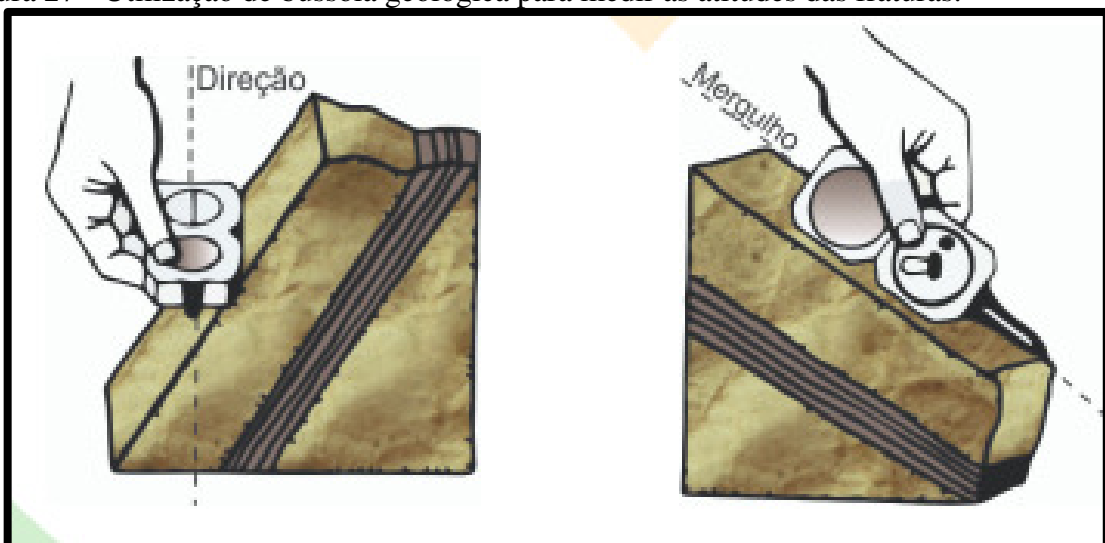
As falhas ocasionadas devido aos esforços sofridos pelas rochas durante sua formação têm direções e mergulho, onde estas podem ser medidas com o auxílio de uma bússola geológica em campo. Estes valores, após plotados em softwares específicos, são representados em um diagrama de rosetas, que nos mostrará a direção preferencial da maioria das falhas (Hencher, 2015).

A tomada da direção dos planos estruturais, como as falhas se realizam diretamente na rocha, essas medidas são tomadas colocando a bússola nesta superfície. Essa orientação pode ser medida de três formas diferentes, mas estas são equivalentes entregando o mesmo resultado (Puerto, 2004).

Essas discontinuidades se apresentam em famílias com características mais ou menos homogêneas. A orientação destas pode gerar instabilidade facilitando a ruptura do maciço rochoso. Podendo ser representados graficamente por projeções estereográficas e diagramas de rosetas (Vallejo et al., 2002).

A atitude é a orientação de um plano ou de uma linha no espaço. Esta, é composta pela direção e mergulho e pode ser medida segundo a figura 27. A direção forma um ângulo horizontal entre uma linha e uma coordenada geográfica (Norte). Já a forma de medir o mergulho é a inclinação de uma linha em relação ao plano horizontal (Salamuni, 2013).

Figura 27 - Utilização de bússola geológica para medir as atitudes das fraturas.



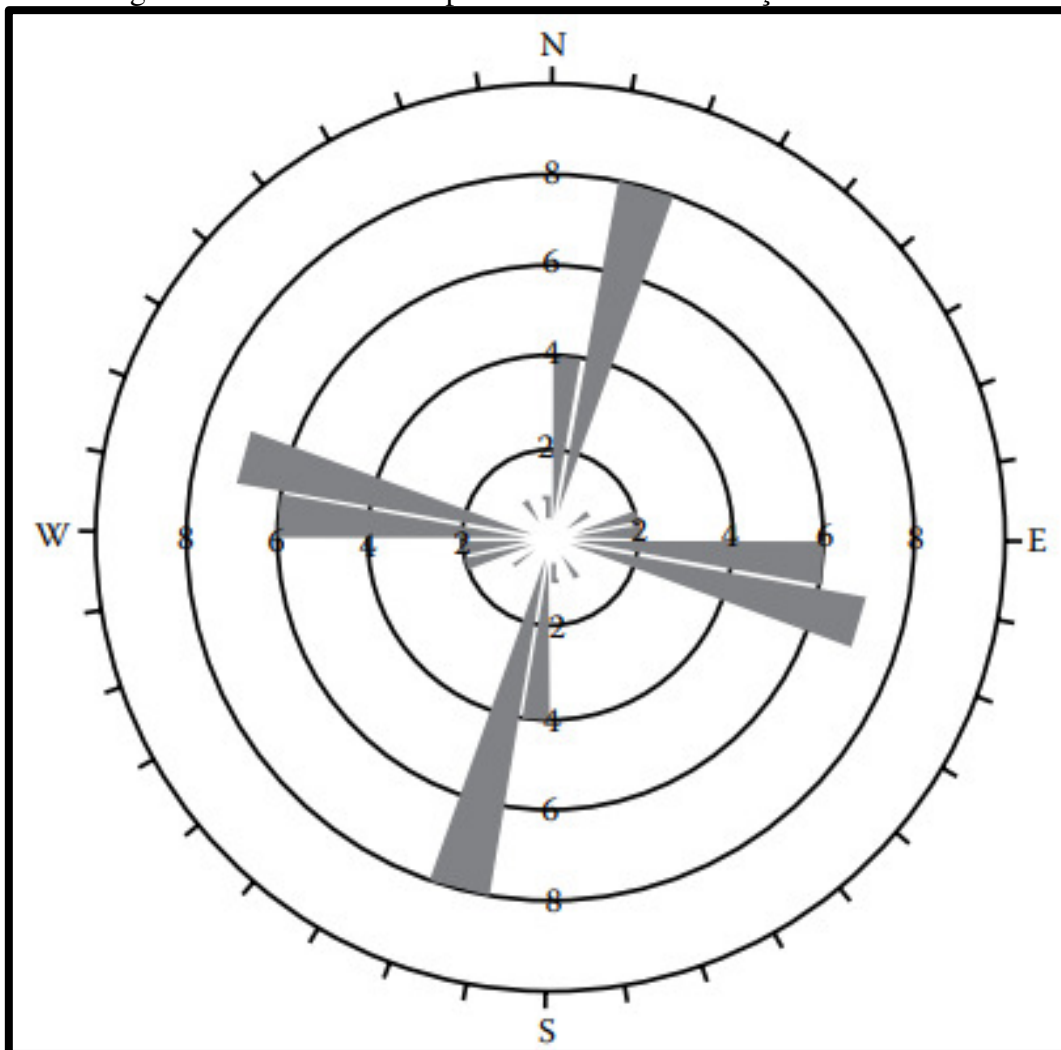
Fonte: Salamuni, 2013

Essas discontinuidades são formadas conforme a orientação da tensão principal (Puerto, 2004). Após a obtenção destes valores, podemos plotar em softwares específicos para as interpretações de risco de queda de blocos e intensidade das fraturas.

Para medir as densidades de fraturas usamos o diagrama de rosetas, que surge para complementar os diagramas de polos. Este diagrama permite identificar as direções estruturais predominantes em uma região, além da frequência destes dados, tornando a utilização deste diagrama como importante fonte de conhecimento (Carvalho, 2010).

O diagrama de rosetas é plotado em um círculo, subdividido de 10 em 10°. Sendo o Norte 0°. Já o Sul, corresponde ao valor de 180°. A linha E coincide com o retículo de 90° e a W com valor de 270°, como pode ser observado na figura 28 (Salamuni, 2013).

Figura 28 - Diagrama de rosetas onde é possível verificar as direções das fraturas.



Fonte: Hencher, 2015

A análise destes diagramas comprova a direção das tensões principais e secundárias, que ao serem aplicadas nos maciços geram as fraturas (Giorgio et al., 2003). O diagrama de rosetas é uma ferramenta fundamental para vermos a direção e intensidade das famílias de fraturas, e como estas se encontram alinhadas com as tensões que a formam.

A linha E-W é subdividida em porcentagens. A escala varia de 0 a 100% (10 em 10%), tanto para W quanto para E, a partir do centro da linha, ou então poderá ser subdividida pela quantidade máxima de atitudes de fraturas para uma dada direção qualquer. Assim, conta-se a quantidade de fraturas de uma determinada área e calcula-se a porcentagem de fraturas direcionadas em um mesmo sentido (Salamuni, 2013).

4 METODOLOGIA

Para este trabalho, inicialmente, foi realizada uma análise da bibliografia existente sobre o tema “estabilidade de taludes em rocha ornamental e redução de fraturas por alívio de tensões”, tendo como pressuposto a necessidade de monitorar os riscos de acidentes por deslizamento de taludes e o aumento da recuperação da lavra de rocha ornamental. Com isso, foi possível observar uma quantidade reduzida de informações neste setor.

Em seguida a pesquisa foi dividida em 3 partes, a primeira parte um levantamento teórico das rochas capixabas, visando avaliar de forma genérica a estabilidade dos maciços rochosos, o segundo momento testa a teoria desenvolvida na etapa anterior, com a utilização de alguns exemplares de rochas da região do noroeste capixaba podendo assim validar a teoria elaborada. E por fim, utilizando uma rocha da região de Casserengue na Paraíba, tentamos validar a estabilidade do talude e determinar a melhor direção de extração.

No presente trabalho, são utilizadas informações oriundas do Catálogo de Rochas Ornamentais do Espírito Santo (Sardou Filho et al., 2013), subseção Granitos e mármore, que possui mais de 100 catalogações, além destas é realizada uma análise da rocha preto São Marcos, que fica situado no interior da Paraíba. As informações foram tratadas estatisticamente, separando os valores de UCS em grupos, possibilitando uma escolha mais adequada destes números, além dos valores de densidade. Para o módulo de elasticidade foi utilizado a equação 4 que se encontra no capítulo 3.6 deste trabalho.

$$E = 2 \times \text{RMR} - 100 \quad (4)$$

Onde:

E = módulo de elasticidade (GPa);

RMR = Classificação de Maciço Rochoso (RMR > 50).

Com os dados estatísticos, foram escolhidos valores de UCS de 75, 100, 125, 150, 175 e 200 MPa, para as rochas silicáticas e 75, 100 e 125 MPa para as carbonáticas. No que diz

respeito ao GSI, este foi selecionado realizando uma análise do RMR e transformando em GSI, conforme equação 6, que se encontra no capítulo 3.7.

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (6)$$

Onde:

GSI = Índice de força geológica;

RMR = Classificação de Maciço Rochoso.

Para se calcular o RMR, se faz necessário uma *scanline* na frente de extração onde se mede a distâncias entre as fraturas, e quão abertas as mesmas se encontram. Ainda é possível realizar o cálculo de RQD, que pode ser feito em campo ou com testemunhos de sondagens em laboratório, além da análise da compressão uniaxial simples, com corpos de provas cúbicos variando de 5 a 7 cm e por fim verificamos se existe água saindo das fraturas, todos esses valores são analisados junto a tabela 3 que se encontra no capítulo 3.10.

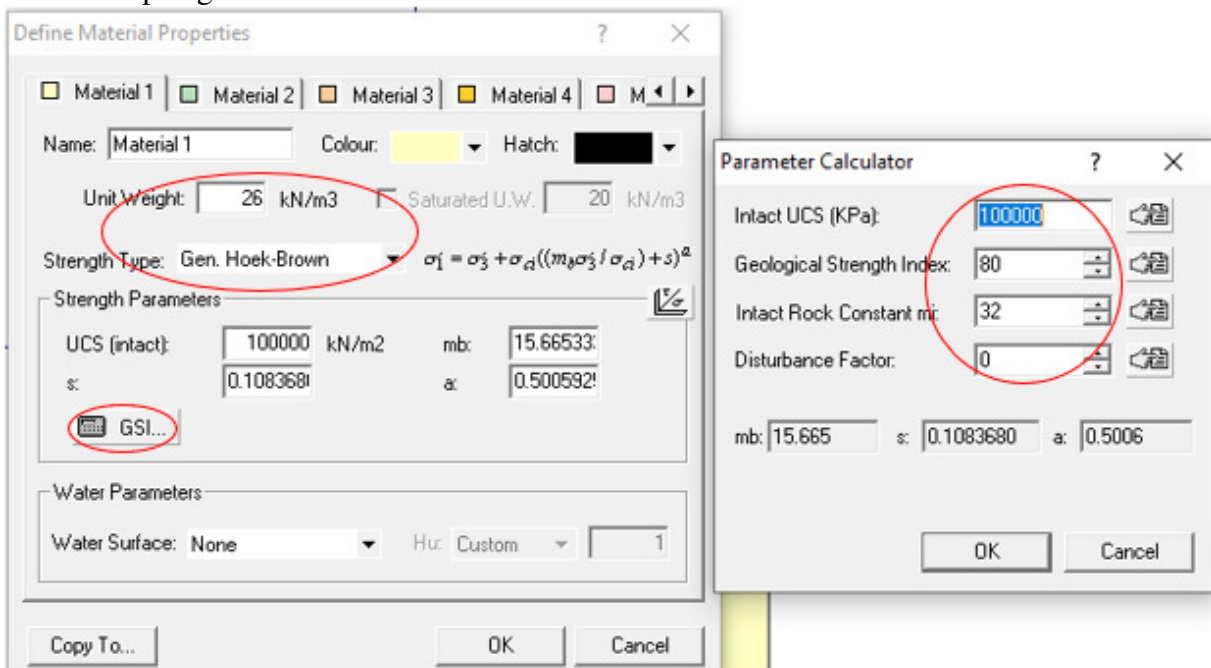
Com relação ao de MI, o valor deste se encontra tabelado no software para qualquer tipo de rocha, e o fator de dano no desmonte (D) foi aplicado o valor de 0, pois uma rocha ornamental tem pouca ou nenhuma perturbação.

De posse dos dados de UCS, as informações são inseridas em um software de simulação numérica do tipo MEF, assim como no software de simulação utilizando o MEL, para determinar o FS ou o Fator de Força (FF) associado às bancadas de rocha ornamental com alturas variando de 5, 20, 50 e 100 metros, que estão sendo utilizadas no Brasil. Para a modelagem e aquisição do fator de segurança, foi utilizado o *software RS2*[®] e o *Software Slide*[®], que se encontram disponíveis no Laboratório de Mecânica de Rochas - MECROCHAS da UFRGS.

No *Software Slide*[®], o primeiro passo dado é ir ao *Project settings* onde inserimos as informações do projeto, unidades, métodos de cálculo dentre outras informações, escolhidas para este trabalho, unidades métricas e selecionando a metodologia de Bishop e Jambu para o cálculo das forças. Em seguida selecionamos a adição das bordas externas, assim é possível

desenhar o talude desejado, no terceiro passo vamos às propriedades do material, onde inserimos a densidade do mesmo, escolhemos os critérios de cálculo, que nosso caso é o generalizado de Hoek e Brown, clicamos na aba do GSI, e inserimos o valor de UCS, GSI, Mi e o fator de distúrbio, como observado na figura 29.

Figura 29 - Inserção de dados no software Slide[®], onde observamos em vermelho os locais citados no parágrafo acima.



Fonte: Silva et al, 2022

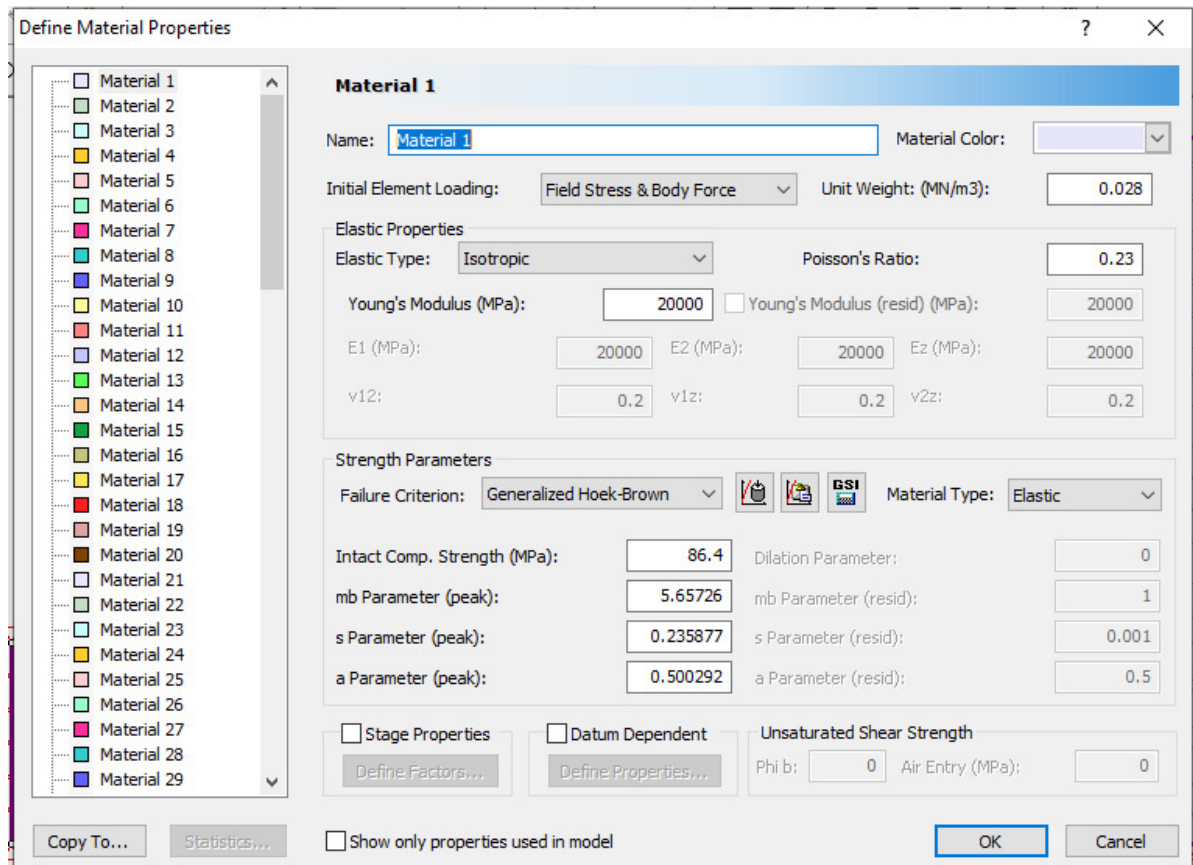
Para finalizar inserimos a superfície que será analisada a falha e o tipo desta, para então criarmos a malha que o software vai utilizar para fazer os cálculos, clicando em autogrid, salvamos o projeto, e solicitamos que o mesmo faça os cálculos. Ao final selecionamos a opção interpretação e conseguimos ver o valor do fator de segurança.

No software RS2[®], o primeiro passo dado é ir ao *Project settings* onde inserimos as informações do projeto em *Project summary*, unidades em geral, sendo escolhidas para este trabalho unidades métricas. Em seguida selecionamos a adição das bordas externas, assim é possível desenhar o talude almejado, no terceiro passo vamos às propriedades do material, onde no menu *initial element loading*, escolhemos *field stress & Body force*, em seguida inserimos a densidade do material.

Nas propriedades elásticas inserimos o coeficiente de Poisson que foi de 0,3 para granitos e 0,23 para mármore. No *Strength Parameters*, escolhemos os critérios de

generalizado de Hoek e Brown, clicamos na aba do GSI, e inserimos o valor de UCS, GSI, M_i e o fator de distúrbio como observado na figura 30. Em seguida clicamos em *field stress parameters*, onde escolhemos *gravity* e selecionamos a superfície de força atual.

Figura 30 – Imagem para definição das propriedades da rocha, que vão ser simulados neste trabalho.



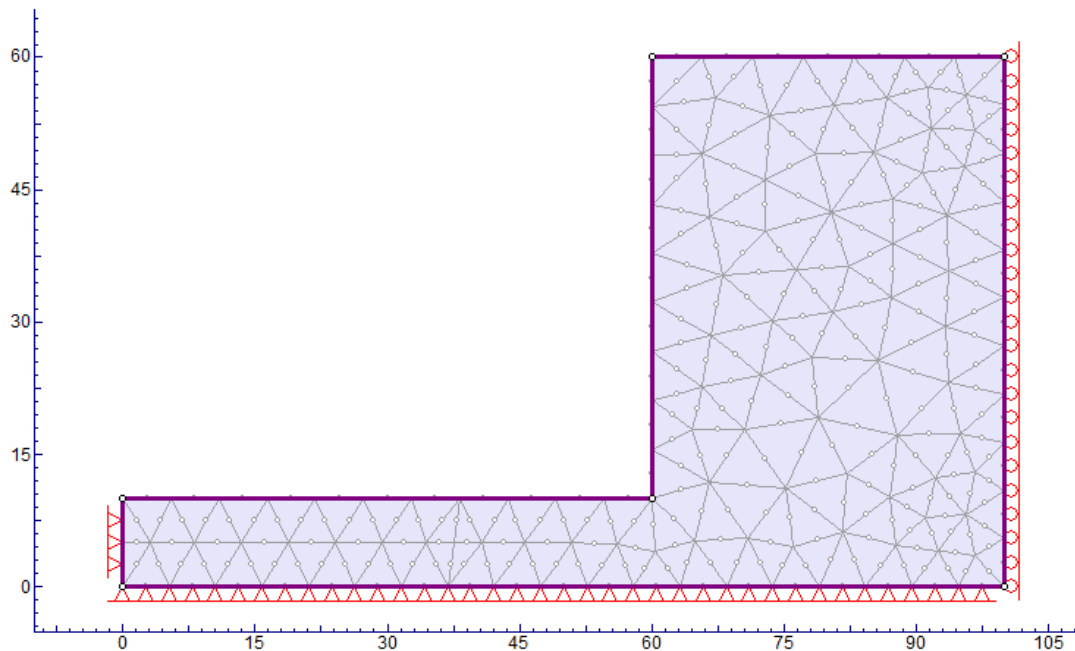
Fonte: Autor, 2022

Para finalizar, selecionamos o *Mesh Setup*, o tipo de malha de grade em triângulo com seis nós, em seguida discretizados e criamos a malha. Após está ser criada, deixamos livre para movimento (*Free Restraints*), o topo da bancada, a face frontal e o piso onde a mesma vai cair após o desmonte. A parte posterior do desenho deve ficar restrito em X, como pode ser observado na figura 31, feito isso salvamos o projeto, calculamos os parâmetros e em seguida interpretamos o resultado selecionando o *interpret*.

Após se verificar se os taludes estão estáveis, ou simular a melhor altura para se iniciar a extração de uma pedreira de RO, chega o momento de avaliar o comportamento das tensões principais e secundárias, desta forma pode-se determinar a melhor direção de extração

(alongante), neste trabalho essa direção foi obtida por meio de uma análise estrutural, onde foi possível avaliar os efeitos dessas forças no maciço rochoso.

Figura 31 - Imagem onde é possível verificar a malha para cálculo das tensões normais e cisalhantes, assim como as restrições de movimento das bordas.

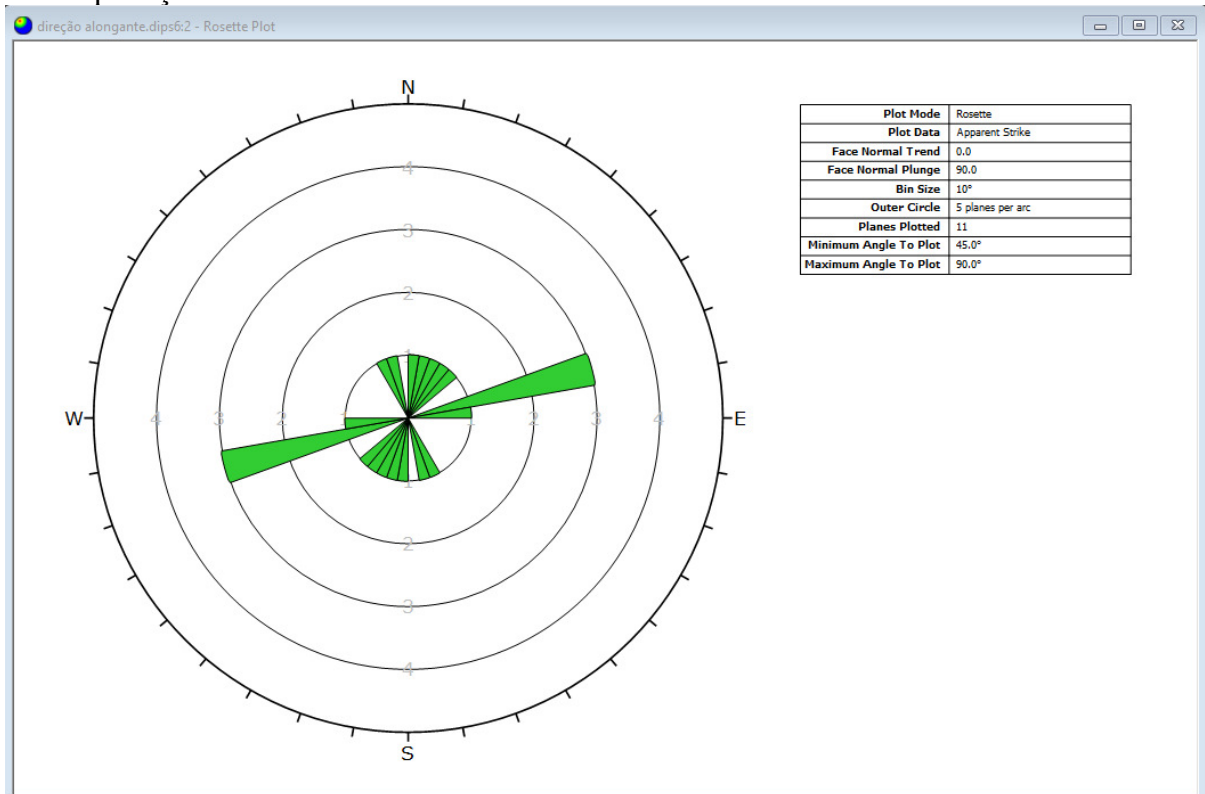


Fonte: Autor, 2022

Na extração do preto são marcos, encontramos uma quantidade maior de fraturas, onde por meio de uma bússola geológica coletamos aproximadamente 12 direções e mergulho. De posse destes valores inseridos no *software Dips*[®], selecionando o *Rossette Preset* para abrir o diagrama de rosetas, com este é possível interpretar a direção da tensão principal, aplicada neste maciço rochoso, como observado na figura 32.

Para a aquisição dos valores de direção e mergulho, foi utilizada uma bússola geológica do tipo brunton, onde se coletou os valores e os inseriu em uma planilha, como podem ser observados na tabela 5, de posse desta planilha os valores foram aplicados no *software dips*[®], possibilitando assim uma análise de suas juntas, o software se encontra disponível no laboratório de mecânica de rocha – MECROCHAS da UFRGS.

Figura 32 – Dados de direção e mergulho inseridos no software, e o diagrama de rosetas para as interpretações.



Fonte: Autor, 2022

Tabela 5 – Valores de *Dips* e *Dips Direction*, das juntas encontradas no maciço do preto São Marcos.

Junta	Dips	Disps direction	Junta	Dips	Disps direction
1	80	255	7	60	300
2	90	355	8	55	275
3	75	345	9	50	290
4	65	340	10	85	310
5	90	245	11	85	340
6	80	285	12	35	235

Fonte: Autor, 2022

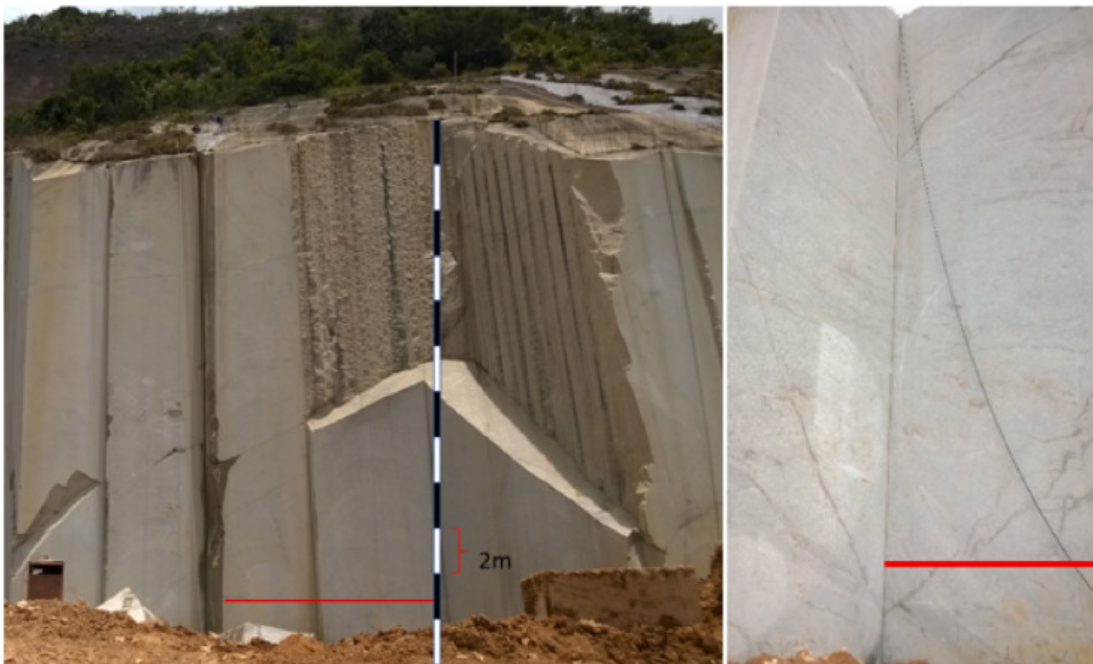
Para realizarmos as análises deste material temos que conhecer seus índices físicos, este já foi abordado por Santos (2012), e os valores de densidade da rocha em questão foi de 2916 kg/m³, já o de UCS, para análise perpendicular ao plano de fraqueza foi de 83,29 MPa e o paralelo a este plano foi de 68,78, estes ensaios foram realizados respeitando a Norma da ABNT NBR 15.845/2010. Assim como sua análise petrográfica que determinou que esta rocha é um Diorito/gabro.

Já segundo Vallejo et al., (2002), os valores de Poisson para este tipo de rocha ficam entre 0,12 a 0,20 e o seu módulo de elasticidade varia entre 1 e 6,5 kg/cm², possibilitando assim

a inserção destes valores no *software RS2*[®], para verificar assim a influência das tensões residuais na estabilidade da bancada.

Para se obter o valor de GSI, foi realizado uma *scanline* na frente de bancada onde se observou o espaçamento entre fraturas, sua qualidade e o seu RQD como observado na figura 33. Após esta análise foi possível determinar o RMR, como mostra a tabela 6 e em seguida aplicar a equação 6 para se obter o valor desejado.

Figura 33 – Scanline de 10 m, nas frentes das bancadas de rochas ornamentais típicas do noroeste capixaba.



Fonte: Silva et al, 2022

Tabela 6 – Valor do RMR, GSI e modulo de elasticidade das rochas.

Tabela A	RMR	
	100 a 250 MPa	Peso 50 a 100 MPa
1 - Resist. A comp. Uniaxial	12,00	7,00
2 - RQD%	20,00	20,00
3 - Espaçamento das descontinuidades	20,00	20,00
4 - Condição das descontinuidades	30,00	30,00
5 - Ação da água	15,00	15,00
6 - Direção do Mergulho	- 5,00	-5,00
TOTAL	92,00	87,00
GSI	87,00	82,00
E (GPa)	84,00	74,00

Fonte: Autor, 2022

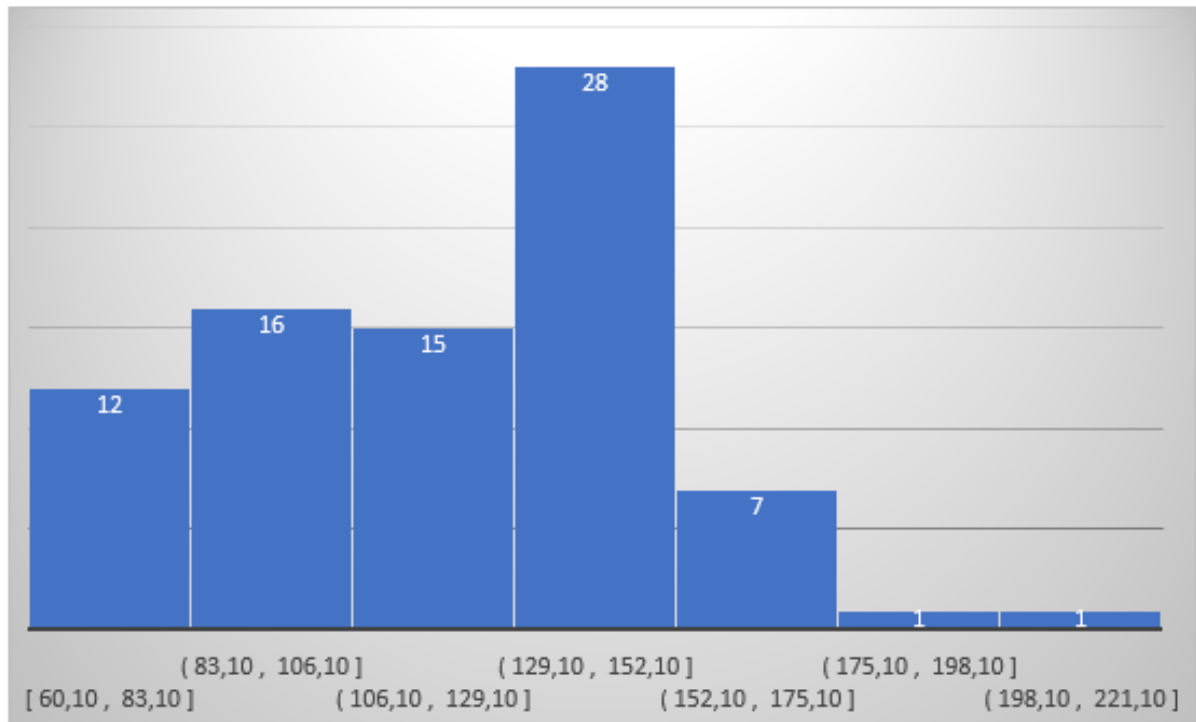
Na utilização do *software* optamos pelo critério geral de ruptura de Hoek-Brown. A rocha em questão foi tida como plástica e o desenho da bancada, ficou livre para movimento em X e Y no topo, em sua frente e em seu piso. Com relação ao MI, o mesmo encontra-se tabelado no software para rocha do tipo gabro, e o fator de dano no desmonte (D) foi-se aplicado o valor 0.0, pois uma rocha ornamental tem pouca ou nenhuma perturbação.

5 RESULTADOS

Na primeira etapa foi utilizado os dados de compressão uniaxial das rochas do estado do Espírito Santo, pensando em criar uma correlação deste valor com as alturas mais utilizadas nos trabalhos de extração de rochas ornamentais deste estado, assim como seu valor de GSI. Apesar desta possível correlação, ela só será válida quando os valores de seus índices de resistência geológica forem iguais ou superiores aos utilizados no trabalho.

Após a seleção dos dados, os mesmos foram inseridos em um aplicativo de planilhas separado em duas categorias, a primeira para rochas silicáticas e a segunda para rochas carbonáticas. Possibilitando a criação de 6 classes estatísticas para a primeira, como pode ser observado na figura 34 e 3 para a segunda, como pode ser observado na figura 35, dentro de cada uma destas escolhemos um valor de UCS, que seria capaz de representá-las.

Figura 34 – Gráfico de distribuição de valores de UCS, para rochas do tipo silicáticas.



Fonte: Autor, 2022

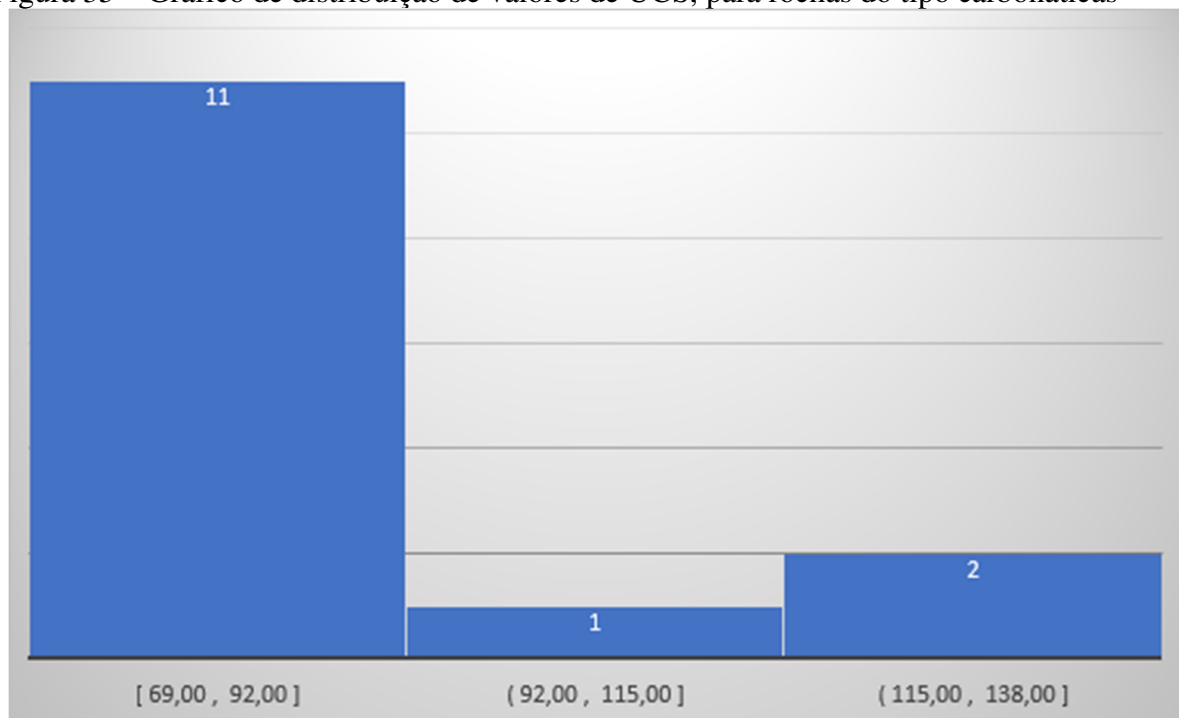
Após análise dos dados foi possível calcular a sua média, mediana e moda, levando em consideração ainda o desvio padrão deste modelo. Tendo a média 119,58 MPa e um desvio padrão de 31,10 MPa, já o valor de sua mediana de 122,34 MPa e a moda foi de 95 MPa,

verificando um indicativo de sua assimetria, já que sua moda tem que ser menor que a mediana que observamos claramente neste estudo.

Sendo assim foram escolhidos os valores de UCS, de 75, 100, 125, 150, 175 e 200MPa, que se torna representativos de cada classe e o último dos pontos extremos, estes crescem de 25MPa para poder se criar um padrão de análise, já que este se encontra dentro de suas classes estatísticas.

Seguindo o mesmo caminho foi realizada a mesma análise para os materiais carbonáticas, onde visualmente temos uma distribuição com assimetria positiva, sendo o valor da média de 90,89 MPa e o desvio padrão de 15,02 MPa, já a mediana tem 86,40 MPa e a moda com 86,40 MPa, levando-se em consideração o que já foi abordado nos parágrafos anteriores, podemos confirmar o tipo de distribuição para essas rochas. E ainda possibilitou a escolha de valores de UCS de 75, 100 e 125 MPa, esses valores foram escolhidos para criar uma uniformidade de valores entre os dois tipos de rochas.

Figura 35 – Gráfico de distribuição de valores de UCS, para rochas do tipo carbonáticas



Fonte: Silva et al, 2022.

Com os valores de UCS e densidade, os mesmos vão ser aplicados em softwares para se determinar o fator de segurança para cada classe de rocha com as respectivas alturas, gerando

um total de 36 interações para avaliação dos taludes, indicando se os mesmos se encontram em equilíbrio ou não.

Segundo Peiter et al., (2001), o mercado brasileiro possui aproximadamente 500 tipos diferentes de material rochoso. Esse trabalho analisou 95 diferentes rochas ornamentais, entre rochas silicáticas e carbonáticas, apresentando 94 no estado do Espírito Santo e 1 no estado da Paraíba. Sendo esse espaço amostral considerado representativo, já que a sua confiabilidade é de 95% e a margem de erro com 9,2% aproximadamente, para essa população escolhida.

5.1 MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE

O primeiro método a ser utilizado na verificação dos fatores de segurança das rochas, será o MEL, com auxílio do *software Slide*[®] da empresa *Rocscience*, este utiliza a respectiva técnica de modo a obter a relação das forças resistivas x as forças atuantes, que nos mostra um valor numérico adimensional capaz de indicar se o talude em questão se encontra em equilíbrio ou se o mesmo pode colapsar.

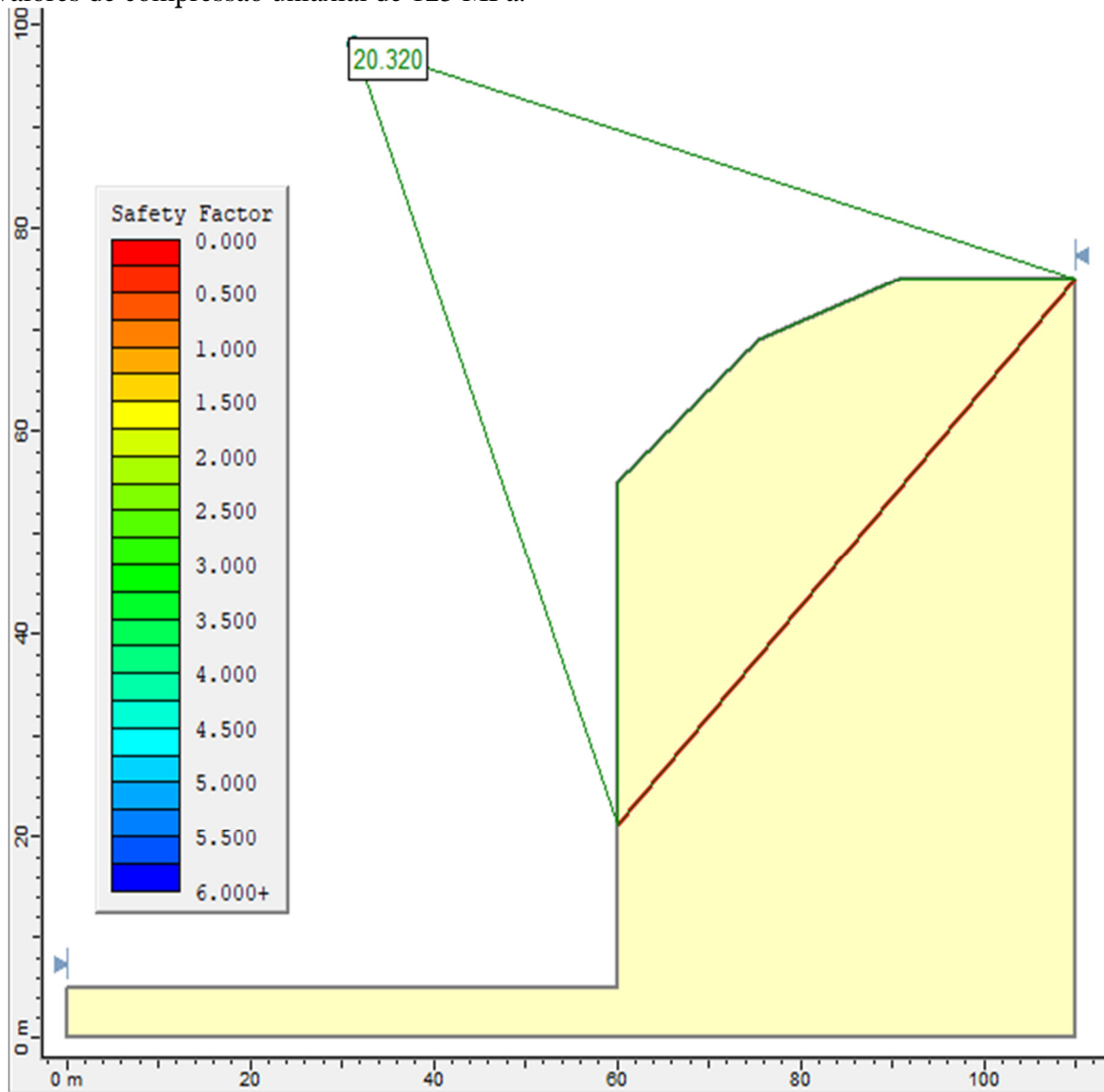
A escolha desta técnica se deve pelo fato de o setor de rochas ornamentais elaborarem planos de estabilidade de taludes com esta, porém a mesma não seria a mais adequada, já que o método é bastante simples em sua análise, pois só considera as forças em suas pequenas lamelas, utilizadas para se calcular a força ao longo da possível superfície de ruptura. A inserção de informações neste é mais simples, apesar de utilizar a técnica generalista de Hoek e Brow.

5.1.1 Rochas Silicáticas

Com os valores de UCS, definidos e aplicando as alturas padronizadas, utilizados nas pedreiras de rochas ornamentais, realizou-se a análise da estabilidade dos taludes para cada cenário, obtendo os fatores de segurança (FS), conforme apresentado na figura 36, este é dado pela razão entre a soma das forças resistentes ao cisalhamento e a soma das forças causadoras do cisalhamento, podendo também ser definido em termos de momentos atuantes e resistivos.

Com o auxílio do respectivo *software* e utilizando uma topografia genérica, que na figura em questão tem 50 m e UCS de 125 MPa, é possível verificar o seu fator de segurança com valor igual a 20.32, indicando que o mesmo se encontra estável.

Figura 36 – Imagem obtida por meio do software slide, com uma altura de bancada de 50m e valores de compressão uniaxial de 125 MPa.



Fonte: Autor, 2022

Apesar da utilização de uma topografia genérica para alturas de bancadas com 5, 20, 50 e 100 metros, a mesma pouco interferiu na análise, possivelmente devido à rocha ornamental se comportar como rocha intacta. Mesmo o modelo apresentando a superfície de ruptura do tipo planar, e considerando os valores de GSI, UCS e MI na análise generalista de Hoek and Brow,

o valor obtido do FS, indicou estabilidade do maciço rochoso com as quatro alturas já citadas.

Ao realizarmos as 24 simulações para as rochas silicáticas, foi possível obter os valores de FS como observado na tabela 7, em cada uma das situações tanto de altura do talude rochoso, bem como para os seus valores de UCS. Na simulação da figura foi utilizado um valor de GSI igual a 80, que é um valor relativamente baixo para esse tipo de material, mas apesar desta escolha foi possível verificar que os respectivos valores de fator de segurança indicando que essas rochas não apresentam instabilidades.

Tabela 7 – Valores de fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI.

UCS (Mpa)	FS			
	5 m	20 m	50 m	100 m
75	56,94	19,61	13,19	7,89
100	74,96	25,36	16,76	9,83
125	92,98	31,11	20,32	11,76
150	111,00	36,85	23,88	13,68
175	129,02	42,59	27,43	15,60
200	147,04	48,32	30,98	17,51

Sendo assim, pode-se determinar que não houve problema com esses maciços rochosos, já que seus fatores de segurança não se aproximam de 1. Porém, ao observar a tabela 7, temos uma disparidade dos valores de FS para as bancadas com 5 m, quando comparada com as demais.

Já para as demais alturas, temos uma mudança menor dos valores, mas se confirma que, quanto maior a altura, menor seu fator de segurança. Tomando como exemplo os valores das bancadas de 100 m e os dados de valor de compressão uniaxial simples analisados, à medida que estes aumentam temos um aumento da segurança das bancadas, apesar desta melhora ser suave, esta não impacta na escolha da altura dos taludes.

A tabela 8, demonstra uma alteração mais significativa do FS, quando comparamos diferentes resultados de GSI, mostrando que a escolha deste é de fundamental importância para este tipo de análise. Sendo assim, para se obter esse dado de forma adequada, se faz necessário a utilização da equação 6, que correlaciona os valores da classificação do maciço rochoso por meio do Rock Mass Rating - RMR, que foi desenvolvido por Bieniawski (1974).

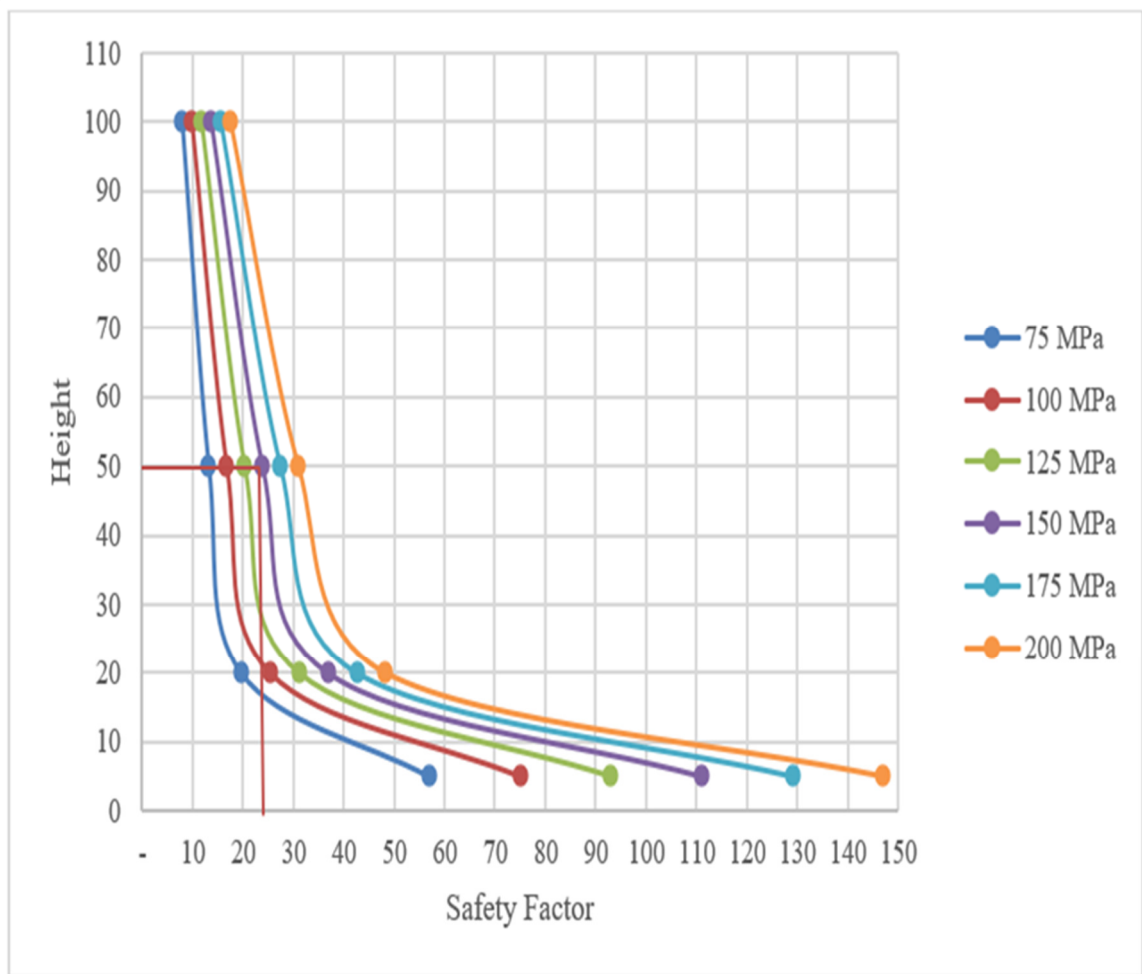
Tabela 8 – Valores de fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI com 82 e 70.

UCS/150 MPa	FS			
	5 m	20 m	50 m	100 m
GSI 82	111,00	36,85	23,88	13,68
GSI 70	38,96	14,13	9,95	6,25

Com a observação dos dados da tabela 8, vemos como a qualidade do maciço e sua posterior classificação é de suma importância para garantir a estabilidade do talude analisado.

Quando alterado o formato de visualização da tabela 7, para o formato de gráfico, como apresentado na figura 37, é possível observar uma tendência da curva do FS para uma constante. Isso quer dizer que, quanto maior a altura da bancada, o valor do fator de segurança segue reduzindo de forma suave, tendendo a nunca chegar próximo de zero para esta situação.

Figura 37 - Gráfico de correlação entre fator de segurança x altura de bancada, para rochas do tipo silicática.



Fonte: Autor, 2022.

Com a análise do gráfico em questão, é possível estimar os valores de FS. Como, por exemplo, uma rocha de 150 MPa e uma altura de bancada de 50 metros, é possível se verificar que a mesma vai ter um fator de segurança aproximadamente de 25, que corresponde ao valor encontrado na tabela 7, que foi de aproximadamente 24. Este fator indica o quanto estável é o talude.

É importante ressaltar que a escala deste fator em questão é exponencial, na qual os dados de FS = 1 (um) representa o FS limite, e quanto mais elevado for este valor mais estável se encontra o talude analisado.

Apesar dos resultados encontrados, a rocha Giallo Topázio, com um valor de UCS de 132,3 MPa, e sua altura média de bancada com 50 m, como apresentado na figura 38, a mesma tem o FS maior que 20, sendo considerado estável. Porém, pode ser observada na figura em questão que a mesma tem uma necessidade de ser realizada um tratamento, para evitar queda de seu capeamento, já que este pode causar acidentes dentro da frente de extração, isso demonstra a necessidade de se ajustar o método de simulação para obter valores mais próximos ao real.

Figura 38 - Talude onde é possível se verificar um tratamento de extração da região instável.



Fonte: Silva et al., 2022.

Após a avaliação do gráfico que se encontra na figura 37, que para qualquer valor de UCS e qualquer altura, esses taludes deveria se encontrar estável, é importante observar com atenção e se comparar os dados teóricos com a observação no campo, já que o capeamento é uma região alterada, não podendo ser simulado da mesma forma que os demais.

Uma das formas que provavelmente necessita de atenção, é no momento de obter o valor do GSI, que inicialmente o setor de rochas ornamentais o faz de forma qualitativa e não quantitativa. Essa informação é muito importante para ser utilizada na simulação, não permitindo que a mesma se encontre equivocada e para isso se deve ser utilizadas técnicas adequadas como será observada nos capítulos a seguir.

5.1.2 Rochas Carbonáticas

Com o término da análise do método de MEL para rochas silicáticas, seguimos para o capítulo 5.1.2, visando verificar se o comportamento das rochas carbonáticas segue as mesmas leis de estabilidade encontrado até o momento, ou serão necessários ajustes que melhor as represente esse material.

A simulação para este tipo de rocha com o método do MEL, segue os mesmos parâmetros para as rochas silicáticas, a opção por topografias sintética para alturas de bancadas com 5, 20, 50 e 100 m, se deve ao fato que a maioria das elevações destes taludes não são precisas, levando a escolha de valores já conhecidos na literatura. Apesar disso, essa não tem um grande impacto na análise, pois a simulação teórica nesta etapa não leva em consideração da presença de descontinuidades, que possam prejudicar a qualidade do maciço.

Sendo assim o GSI é utilizado para realizar a análise de estabilidade, esse por sua vez considera em sua escolha a qualidade do maciço, incluindo possíveis descontinuidades, obtendo ao fim resultados que informem sobre possíveis colapso das bancadas, independente das alturas utilizadas.

Após o término das simulações podemos observar os resultados destas, na tabela 9, onde ocorre a mesma disparidade do fator de segurança das bancadas de 5 m em relação às demais, o que nos indica que apesar destas não terem uma melhor economicidade, porém não apresentaram risco de instabilidade, ficando sua altura limitada aos poucos planos de fraturas encontrados na rocha.

Tabela 9 - Valores do fator de segurança, relacionados com a altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI.

UCS (MPa)	FS			
	5m	20m	50m	100m
75,0	229,93	59,98	26,39	19,83
100,0	306,20	79,61	35,20	26,60
125,0	382,47	99,24	44,04	33,41

Fonte: Silva et al, 2022.

Já para as demais alturas, temos uma mudança menor nos valores do fator de segurança, mas se confirma que quanto maior a altura, menor seu fator de segurança. Tomando como exemplo os valores da bancada de 100 m e os diversos valores de UCS analisados, vemos que apesar do fator de segurança melhorar com o aumento do valor de UCS, essa melhora é suave, não impactando na escolha da altura da bancada.

Na tabela 10, observamos uma mudança mais significativa dos valores do fator de segurança quando se é comparado diferentes resultados de GSI, mostrando que a escolha deste valor é fundamental para a análise.

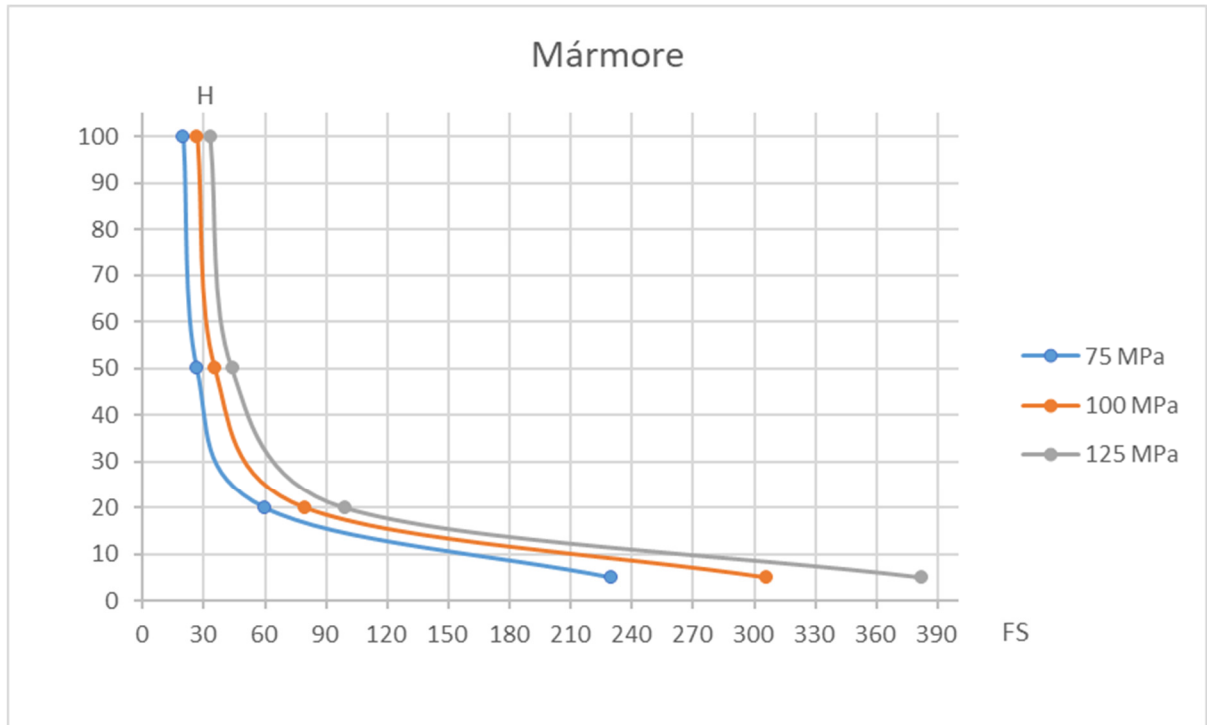
Tabela 10 - Valores do fator de segurança relacionadas à altura da bancada, valor da resistência à compressão uniaxial e a qualidade da rocha pelo GSI com 90 e 80.

UCS/150 Mpa	FS			
	5m	20m	50m	100m
GSI 90	382,47	99,24	44,04	33,41
GSI 80	201,04	52,63	23,07	17,25

Fonte: Silva et al, 2022.

Ao alterar a forma de visualização dos resultados da tabela 9, para o formato de gráfico é possível apresentar a figura 39, onde se é observado o comportamento dos valores de FS em relação à altura das bancadas, confirmando que quanto maior for o UCS, melhor será o resultado em relação à estabilidade do talude. Também é possível observar uma tendência que a curva do fator de segurança tende para uma constante, isso quer dizer que quanto maior a altura da bancada, esse resultado vai reduzir de forma suave, tendendo a nunca chegar próximo de 1, que o limite para essa avaliação.

Figura 39 – Gráfico de correlação entre o fator de segurança e altura da bancada.



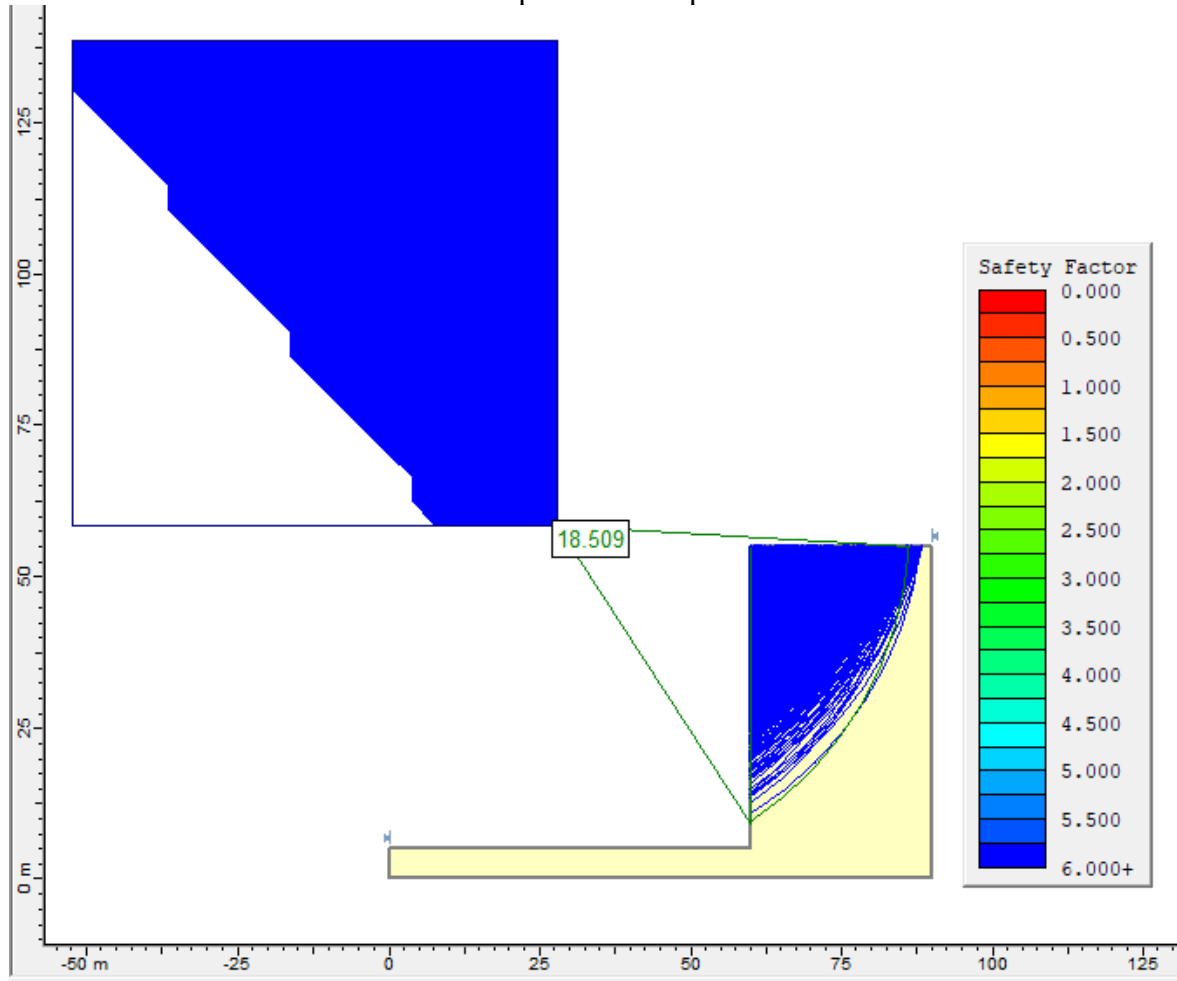
Fonte: Silva et al, 2022.

Esse gráfico representa a estabilidade dos taludes de rocha ornamental, indicando que para qualquer altura de extração, o mesmo se encontra estável para essas operações. Porém, essa afirmação não é bem verdade. Mesmo as rochas carbonáticas que apresentam bons valores de FS, em alturas mais elevadas, essas tendem a ter problemas de instabilidade. Já que o desmonte de rochas inadequado realizado no maciço cria algumas descontinuidades artificiais que precisam ser levadas em consideração na simulação.

É importante ressaltar que a escala em questão é exponencial, na qual os valores do fator de segurança iguais a 1 (um) representam o FS limite, e quanto maior ele for mais estável se encontrar o talude analisado.

Visando demonstrar o que ocorre na simulação a figura 40, apresentar a análise de estabilidade cujo objetivo é indicar se o talude com 50 m e o UCS de 100 MPa se encontra seguro para as operações, neste exemplo em particular foi realizada uma análise onde o modelo de ruptura é não circular, com valores mais próximo do real.

Figura 40 - Simulação de um mármore com altura de 50m e valor de compressão uniaxial de 100 MPa. Onde se encontra marcada a superfície de ruptura analisada.



Fonte: Silva et al, 2022

A figura em questão, apresenta uma análise onde qualquer ponto selecionado no talude que tem 50m de altura, e um valor de compressão uniaxial de 100 MPa, o mesmo se encontra estável com um valor de FS de 18,51. Como as rochas não tem um comportamento homogêneo em toda a superfície, esse valor do fator de segurança deveria ser diferente ao longo do corpo rochoso, o que não ocorre quando é utilizado a técnica de MEL, sendo assim importante a utilização de uma nova técnica para essa simulação.

5.2 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

A utilização do MEL se encontra dentro da primeira etapa deste trabalho, que visa de criar uma correlação entre a altura e fator de segurança. Neste capítulo em questão vai ser

modificado como se obtém o GSI, pois é mais adequada se utilizar da equação que correlaciona o mesmo com o RMR, possibilitando assim a obter este valor de forma quantitativa, permitindo a redução de possíveis erros advindos da baixa experiência do usuário.

A utilização deste método requer parâmetros de entrada representativos que descreva a resistência do maciço rochoso e sua qualidade, podendo assim por meio de equações diferenciais determinar a estabilidade dos taludes, levando em consideração os valores das tensões normais e cisalhantes, utilizando o critério generalista de Hoek e Brow para este cálculo, oferecendo uma melhor representatividade do modelo com a realidade.

A utilização deste modelo possibilita não só demonstrar o equilíbrio deste talude, além de uma análise das forças que estão influenciando o deslocamento das massas ou sua ruptura. Este fica limitado a uma análise de um comportamento simples, com pequenas deformações.

5.2.1 Rochas Silicáticas

Quando analisamos as rochas silicáticas, com valores de UCS de 75, 100, 125, 150, 175 e 200 MPa, e alturas de 5, 20, 50 e 100 m, podemos obter os valores do fator de força (FF) de forma mais próxima à realidade como observado na tabela 11. Ao se analisar os resultados conforme demonstrado na respectiva tabela, vemos uma alteração muito grande dos valores, já que aqui temos valores próximo de 1, o que não aconteceu quando utilizado a técnica de MEL.

Tabela 11 – Valores do fator de segurança, utilizando MEF.

UCS	FF			
	5 (m)	20 (m)	50 (m)	100 (m)
75,00	10,00	3,00	1,50	1,00
100,00	18,00	5,00	2,00	1,50
125,00	20,00	6,00	2,50	2,00
150,00	20,00	6,50	3,00	2,00
175,00	20,00	7,00	3,00	2,50
200,00	20,00	8,00	3,50	2,50

Fonte: Autor, 2022.

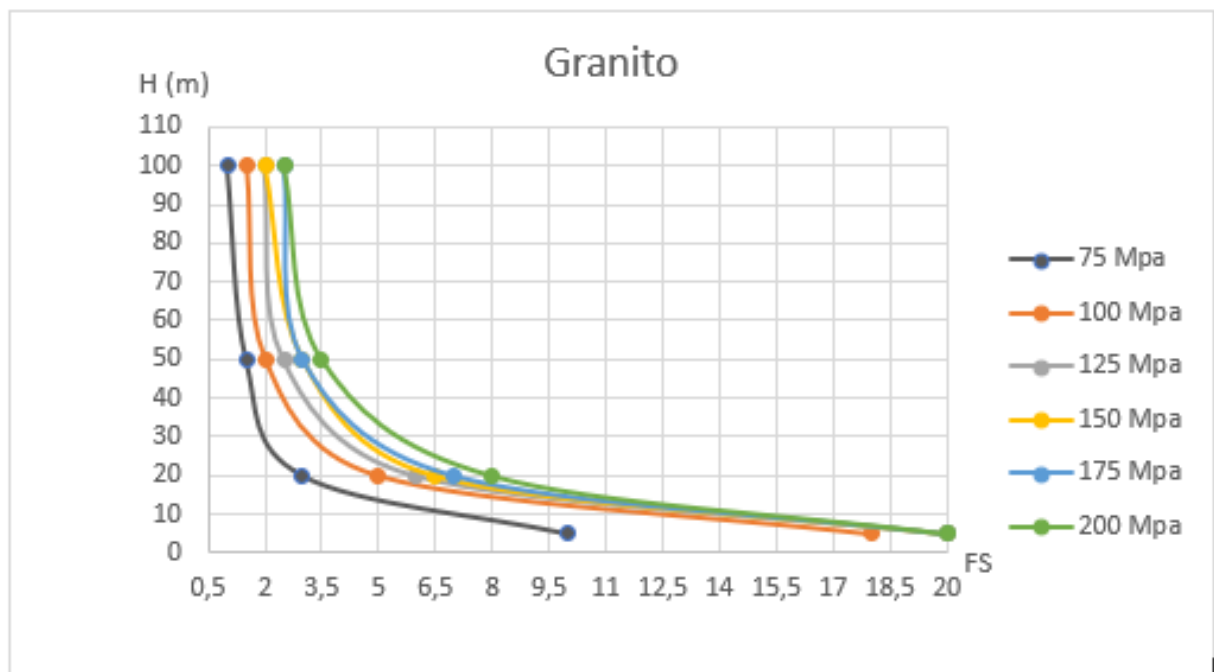
Esses valores encontrados por questão de escala estão variando de 0 a 20, e sendo alterados de 0,50, devido a isso não termo valores partidos diferentes dos que estão sendo

apresentados. Como temos valores que estão abaixo do recomendado para taludes temporários de 1,2 a 1,5, temos que ter atenção a estes para evitar sua ruptura.

Para se garantir a segurança das operações em taludes com alturas superiores a 50m, deve-se adotar valores de FF superiores a 2, que são valores obtidos para taludes permanentes. Sabendo que a qualidade da matriz rochosa vai influenciar diretamente na obtenção desses valores de equilíbrio do maciço rochoso.

O comportamento dos resultados obtidos pode ser observado graficamente na figura 41, onde este nos apresenta de forma simples a relação da altura e do FF da rocha, além de sua qualidade de sua matriz rochosa, selecionada para essa simulação. A correlação destes valores a seguir, facilita a tomada de decisão para a escolha da melhor configuração a ser utilizada, em termos da elevação e segurança de extração destas frentes.

Figura 41 – Valores da altura do talude rochoso x FF, para os diferentes valores de UCS.



Fonte: Autor, 2022.

Consoante ao que foi apresentado na respectiva figura, os valores de UCS inferiores a 100 MPa, devem limitar sua altura de extração em 50m, quando temos 125 MPa sua elevação não deve ultrapassar os 70m, com 150 MPa não devemos ultrapassar os 100m, os demais valores não apresentam problemas, pois todos se encontram acima de 2.

Qualquer alteração nos parâmetros da qualidade da rocha este valor pode ser reduzido, explicando assim o problema do Giallo Topázio, que sua camada superficial se encontra intemperizada, alterando a qualidade de sua matriz rochosa, o que não foi levado em consideração na simulação.

Como qualquer alteração na qualidade da matriz rochosa influencia diretamente na simulação, para se utilizar o GSI no software é interessante fazer uma análise dos valores de RMR e depois correlacioná-lo com o valor em questão, como já abordado no capítulo 4, aqui apresentamos na tabela 12 a seguir estes valores.

Tabela 12 – Valores de qualidade do maciço rochoso (RMR), obtidos por meio de investigação geotécnica, em uma frente típica de rocha ornamental.

RMR	
Tabela A	Peso
1 - UCS	12,00
2 - RQD	17,00
3 - Espaçamento das descontinuidades	20,00
4 - Condição das descontinuidades	25,00
5 - Ação da água	15,00
6 - Direção do Mergulho	- 5,00
TOTAL	84,00
GSI	79,00

Fonte: Autor, 2022.

Com essa coleta de dados geotécnicos conseguimos imputar os valores de GSI de forma mais adequado na simulação, não sendo um resultado empírico que depende da experiência da pessoa que irá fazer a simulação, sendo essa investigação realizada em duas etapas, a primeira na frente de extração e a segunda em laboratório.

Com uma simulação mais realista, pois trabalhamos com valores quantitativos e não qualitativos, além do GSI já levar em consideração famílias de descontinuidades em seu modelo de análise. Esta simulação nos permite ver o comportamento ao longo da frente de extração como mostrado na figura 42, pois vemos que a uma variação deste ao longo da matriz rochosa.

5.2.2 Rochas Carbonáticas

O comportamento deste tipo de material é melhor neste caso, assim como no método do equilíbrio limite, justificando o porquê de na Itália e Portugal esse material ser extraído por poços com profundidades superiores aos 100 m e utilizarem técnica de lavra subterrânea também, pois o desempenho mecânico desta rocha é melhor que as rochas silicáticas.

Na figura 43, podemos ver que apesar de utilizarmos critérios similares na simulação das rochas carbonáticas estes não apresentam problemas de estabilidade, ficando seu menor valor de FF em torno de 2, utilizando a mesma técnica de escala vemos que os valores do fator de força para os mármore quando as bancadas são muito baixas, obtém-se resultados superiores a 20.

Figura 43 – Valores de FF, para rochas carbonáticas e suas alturas.



Fonte: Autor, 2022.

Porém, ao ser analisada a imagem anterior, as rochas com 75 MPa, tem uma tendência de quando aumentarmos a sua altura, o seu FF fique entorno do fator de risco para as alturas mais elevadas, diferente do que vemos com os demais valores. Para isso apresentamos a tabela 13 a seguir, onde são apresentados os dados obtidos para a construção da figura anterior, sendo possível uma melhor visualização destas informações.

Tabela 13 – Apresentação dos valores do Fator de segurança, obtidos para os mármorees.

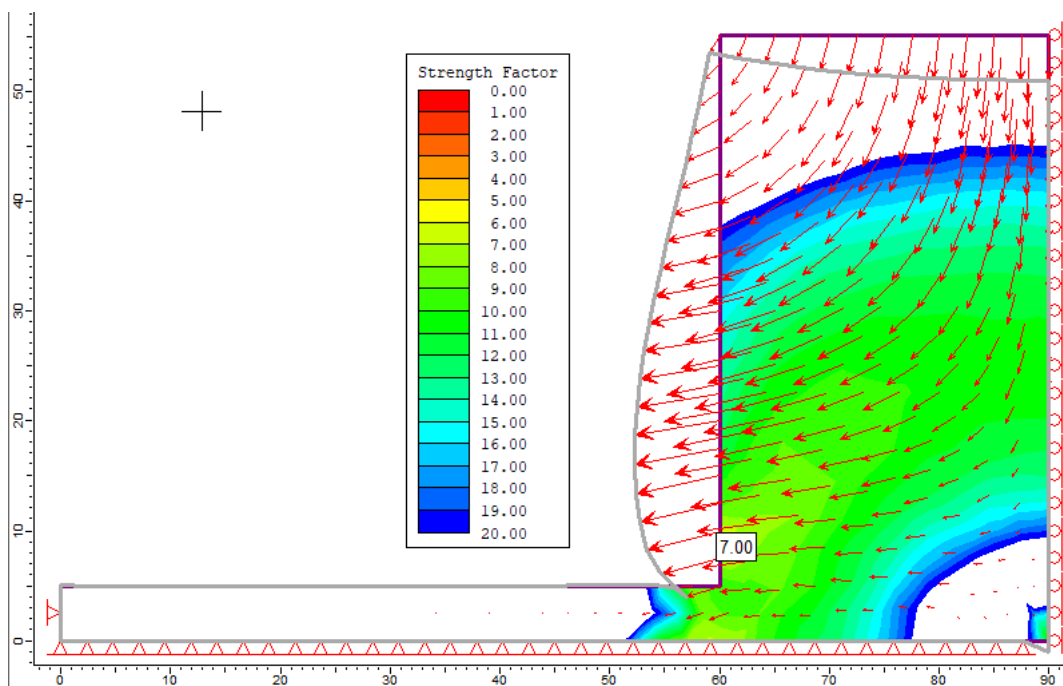
UCS	FF			
	5 (m)	20 (m)	50 (m)	100 (m)
75,00	20,00	8,00	4,00	2,00
100,00	20,00	13,00	5,00	3,00
125,00	20,00	16,00	6,00	4,00

Fonte: Autor, 2022

Desta forma percebe-se que o comportamento das rochas estudadas aqui, são similares as demais, quanto menor a altura do talude, maior seu fator de força, como já demonstrado anteriormente, sendo assim, é possível inferir que sua altura continua a aumentar, não deveríamos ter problemas com estabilidade, desde que respeitada as suas descontinuidades na simulação.

Buscando entender melhor esse comportamento, foi realizada uma simulação de bancada com 50 m de altura como pode ser observado na figura 44, tendo sua escala de fator de força variando de 0 a 20, o seu UCS 125 MPa e o valor de GSI de 84, assim obtemos os valores de FF. Apesar do comportamento deste maciço ser compatível com as demais, demonstrando nesta simulação que ela é uma rocha muito competente, já que na ocasião não se apresenta cores alaranjadas ou vermelhas.

Figura 44 - Simulação de rocha carbonática, para obtenção do valor de FF com altura de 50m.



Fonte: Autor, 2022

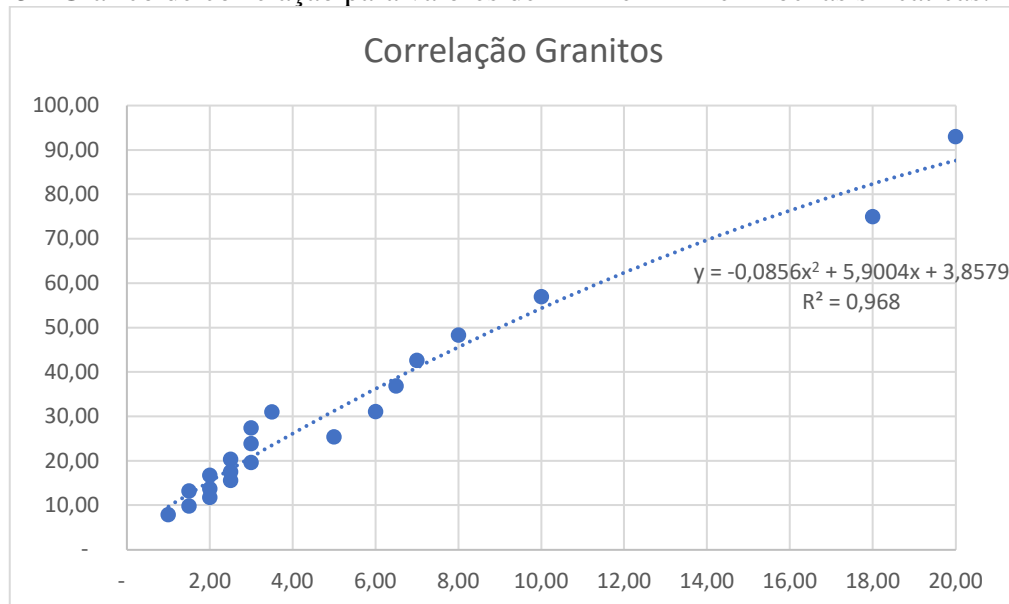
Após ser observado o comportamento competente do material, em relação às rochas silicáticas, pode-se dizer que às técnicas de extração utilizada são adequadas para este tipo de material rochoso, não tendo problemas de estabilidades e manteríamos a segurança de trabalhadores e equipamentos, reduzindo assim o número de acidentes deste tipo, melhorando desta maneira a forma de como o setor é visto, e reduzindo o custo com a seguridade social.

5.2.3 Correlação MEL x MEF

Com o resultado dos fatores de segurança e dos fatores de força, tanto para rocha silicática como para rocha carbonática é possível criar uma correlação entre os mesmos, sendo assim pode-se obter uma nova equação que converta os valores de FF em FS e vice-versa. Logo na figura 45, vemos um gráfico de dispersão onde apresentamos a equação da curva criada e o R^2 , este quer dizer que quanto mais próximo de 1 melhor a correlação dos dados.

A curva escolhida na correlação foi uma polinomial, pois está foi a que apresentou o melhor valor de R^2 , considerando assim sua melhor correlação dos dados encontrados, sendo necessário excluir três valores extremos que se referem as bancadas de 5 m de altura.

Figura 45 - Gráfico de correlação para valores de MEF e MEL em rochas silicáticas.



Fonte: Autor, 2022.

De posse da equação 15, todas às vezes que obtivermos os valores de força por uma simulação utilizando o método de elementos finitos ou equilíbrio limite, vamos poder encontrar

os resultados que melhor se adequem ou que seja mais amigável para o usuário ou leitor do relatório que será analisado.

$$FS = -0,09FF^2 + 5,90FF + 3,86 \quad (15)$$

Onde:

FS = fator de segurança;

FF = fator de força.

Foi então realizado o mesmo trabalho para as rochas carbonáticas, gerando a equação 16, como pode ser observado na figura 46, o resultado da análise encontrado. Onde a escolha da curva linear se adequa bem ao resultado encontrado, demonstrado por seu valor de R^2 que está próximo de 1.

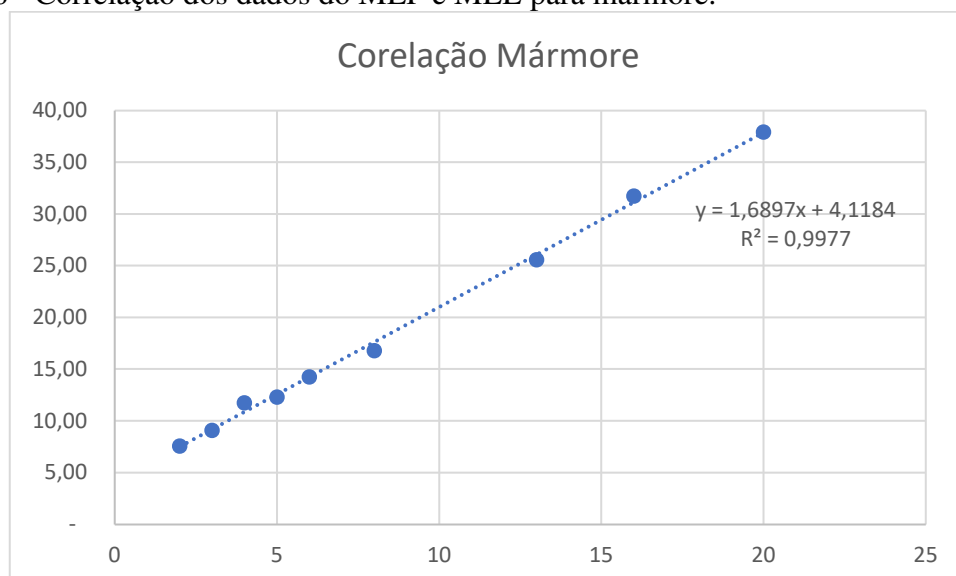
$$FS = 1,69FF + 4,12 \quad (16)$$

Onde:

FS = fator de segurança;

FF = fator de força.

Figura 46 - Correlação dos dados do MEF e MEL para mármore.



Fonte: Autor, 2022.

5.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Na segunda etapa 2 de desenvolvimento da pesquisa, foi verificado se os valores teóricos encontrados, se aproximam aos resultados encontrados nas frentes de extração, já que neste passo pode-se obter alguns exemplos coletados em pedreiras de rochas ornamentais do noroeste capixaba para rochas silicáticas e sul para as carbonáticas. Essa análise será realizada com base em imagens capturas, visita de campo e alguns dados obtidos pelo catálogo de rochas ornamentais da CPRM.

5.3.1 Rochas Silicáticas

Para estimar com certa confiabilidade os parâmetros dos maciços rochosos, realizou-se uma *scanline* que possibilitou a aquisição dos dados geotécnicos. Após a obtenção destes valores e sua transformação em valores de GSI, como pode ser observado na tabela 14, foi possível iniciar os trabalhos nos aplicativos anteriormente citados, que utilizam o critério geral de ruptura de Hoek-Brown. No *software RS2*[®], a rocha foi classificada como plástica e o desenho da bancada ficou livre para movimento em X e Y no topo, em sua frente e em seu piso.

Tabela 14 - Valores de RMR e GSI obtidos por meio de análise geotécnica.

Dados Geotécnicos	RMR	
	Peso Gold 500	Peso Verde Jade
1 - Resistência à comp. Uniaxial	12,00	12,00
2 - RQD%	17,00	17,00
3 - Espaçamento das descontinuidades	15,00	15,00
4 - Condição das descontinuidades	30,00	30,00
5 - Ação da água	15,00	15,00
6 - Direção do Mergulho	- 5,00	- 5,00
TOTAL	84,00	84,00
GSI	79,00	79,00

Fonte: Silva et al, 2022.

Após a escolha dos materiais no atlas, obteve-se acesso a duas frentes de extração no noroeste capixaba, como pode ser observado na figura 47. Ambas as rochas são geologicamente conhecidas como gnaiss: o de nome comercial Gold 500 (rocha 2), apresentando valor de

resistência a compressão uniaxial de 138 MPa, e o de nome comercial Verde Jade (rocha 1), com UCS de 106,91 MPa. Para o GSI, foi utilizado 79 e obtido por meio da equação 6. O M_i é uma constante do material rochoso, que se encontra tabelado no *software* para rocha do tipo gnaisse, e para o fator de dano no desmonte (D) foi aplicado o valor 0,0, pois uma rocha ornamental tem pouca ou nenhuma perturbação. O valor da densidade foi considerado como 2,6 kg/m³ e o seu Poisson adotado é de 0,3, que é característico deste tipo de rocha.

Figura 47 - Frente de extração do material Gold 500 (à esquerda) Maciço rochoso de onde se extrai a rocha ornamental Verde Jade (à direita).



Fonte: Silva et al, 2022

Além da obtenção do valor do GSI por meio do RMR conforme equação 6. Como já obtivemos o valor do RMR, pode-se assim obter também, o módulo de elasticidade utilizando a equação 4 onde:

$$E = 2 \times RMR - 100 \quad (4)$$

$$GSI = RMR_{1989} - 5 \quad (6)$$

Onde:

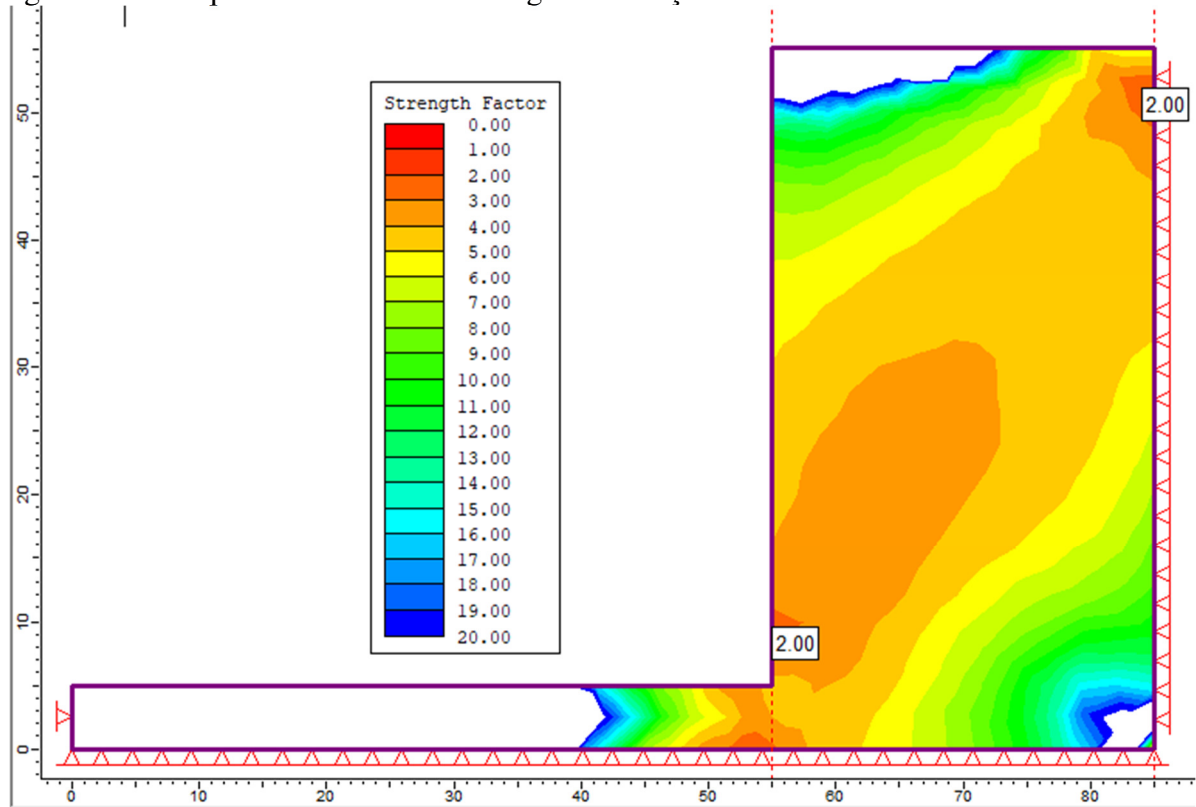
RMR é a classificação do maciço rochoso;

E é o módulo de elasticidade; e

GSI é o índice de resistência geológica.

Após encontrar o valor do GSI, todos os dados foram inseridos nos respectivos aplicativos de análise, encontrando-se assim os valores do FS e FF, a figura 48, apresenta os valores de fator de força. Ao observarmos o comportamento deste ao longo do corpo simulado, temos uma variação ao longo do corpo rochoso, visualizando uma região de maior risco no pé da bancada ou em sua parte posterior superior.

Figura 48 - Comportamento do FF ao longo do maciço rochoso em uma bancada de 50 m.



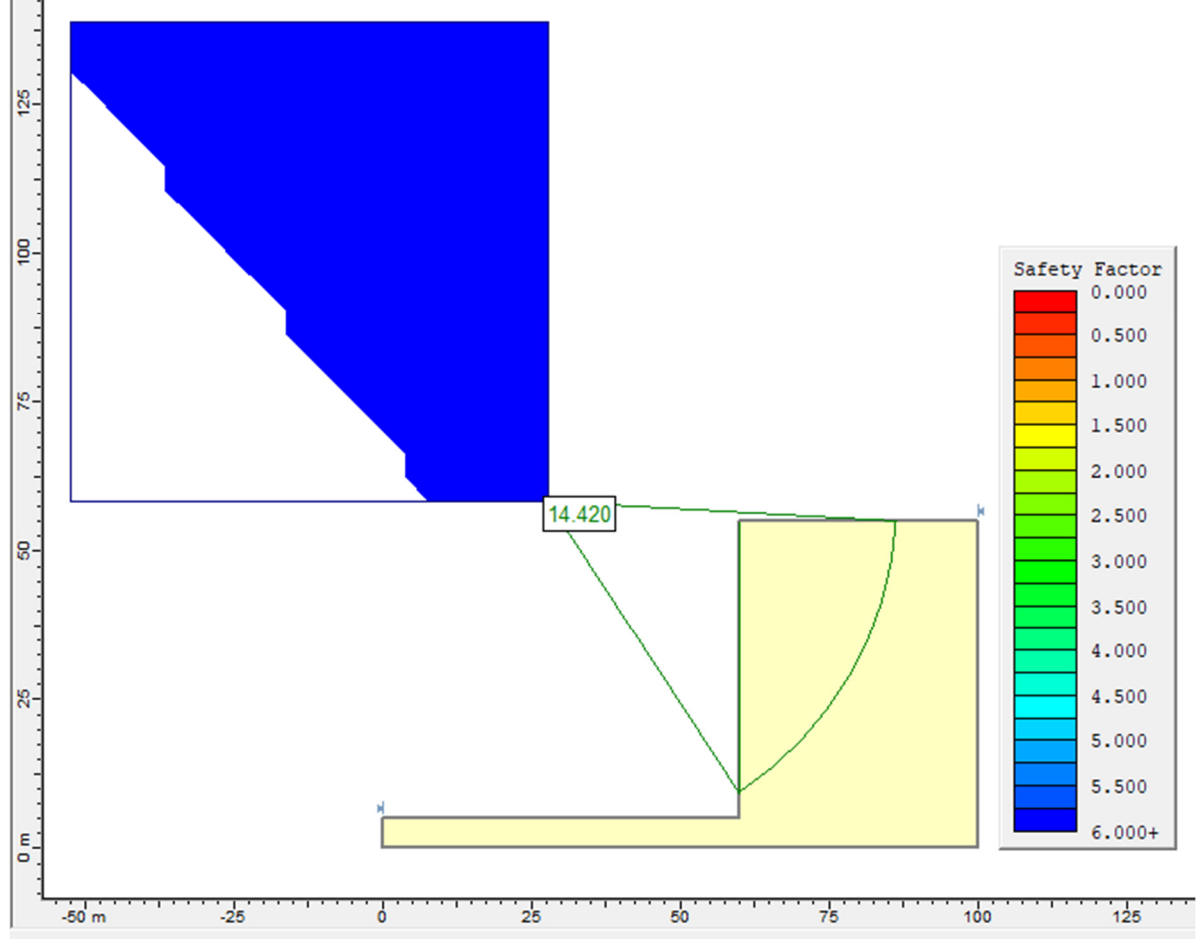
Fonte: Silva et al, 2022

Apesar de encontrarmos valores maiores do que os sugeridos pelos diversos autores, observamos que, se nesta região tiverem falhas que porventura venham a se desenvolver posteriormente, estes valores serão alterados. Entretanto, observamos que, ao simular juntas no modelo, a rocha mantém seu valor de FF em 2, tanto na parte inferior, quanto na posterior. Deste modo é possível, uma pequena margem para alteração do modelo sem apresentar risco de colapso da estrutura, bem como à segurança de colaboradores.

Na apresentação dos valores de FS na figura 49, vemos que o aplicativo em questão não apresenta seus valores no desenho do próprio maciço, mas o *software* marca a região que está

sendo avaliada pelo método do equilíbrio limite. Este considera que as forças atuam de forma igual em todo maciço, tendo o seu valor de 14,42.

Figura 49 - Comportamento do FS ao longo do maciço rochoso em uma bancada de 50 m.

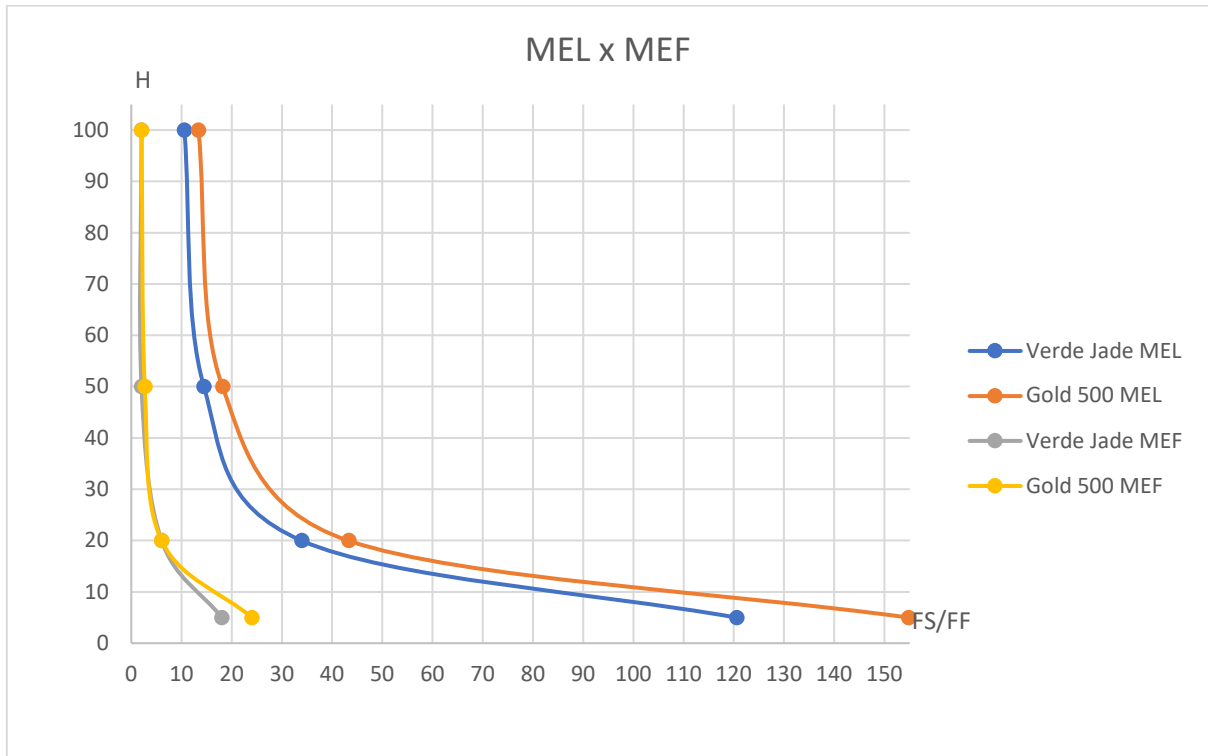


Fonte: Silva et al, 2022

No entanto, quando é comparado o valor encontrado na figura 49 com o valor encontrado na figura 48, vemos que este comportamento homogêneo não corresponde com a realidade para esta situação, já que as forças atuantes no maciço não são homogêneas, consequentemente, fazendo com que os valores de FF variem ao longo da bancada, como mostrado na respectiva figura.

Após análise dos valores obtidos, estes foram inseridos em um *software* de planilha para se criar um gráfico como o da figura 50, tendo assim uma melhor visualização do comportamento do fator de segurança e do fator de força em relação à altura da bancada.

Figura 50 - Comportamento do FS e FF em relação à altura das bancadas utilizando as duas formas de análise.



Fonte: Silva et al, 2022

Ao observarmos o gráfico, temos a curva azul que representa a rocha Verde Jade, com valor de UCS de 106,91 e a de cor laranja que representa o material Gold 500, que tem valor de UCS de 138. Ambas foram simuladas com o MEL. Já a curva cinza representa a rocha 1 e a amarela representa a rocha 2, e ambas utilizaram o MEF. No gráfico percebe-se de forma clara a diferença de valores gerados pelas duas metodologias.

Nas bancadas baixas com 5 m de altura utilizando o MEL, temos valores de FS que passam de 100. Para esta mesma altura, observando o resultado do MEF, é obtido resultados de FF em torno de 15 a 30. Essa grande diferença indica a um entendimento que a escolha do primeiro método não é adequada para este tipo de situação, mas é prematura só com a análise da primeira altura da bancada.

Quando se observa as bancadas médias com 20 m, utilizando os métodos já anunciados, vemos que, no primeiro, o valor do FS varia entre 30 e 50. Já no segundo, o valor de FF é inferior a 10. Ao serem analisada as bancadas altas com 50 m, o valor do fator de segurança para o primeiro método encontra-se entre 10 e 20. No segundo modelo, temos os valores de fator de força entre 2 e 5.

Já as bancadas ultras altas com 100 m, o valor do FS para o primeiro método apresenta-se entre 10 e 15, e no segundo método, os valores de FF se aproximaram de 2. Quando observamos apenas as curvas azul e laranja, os resultados têm uma diferença maior quando relacionamos o valor de UCS com a altura. Já nas curvas cinza e amarela, essa diferença é mais discreta.

Quando se observa com mais atenção apenas as curvas que utilizaram o modelo de MEF, é possível verificar que a diferença entre os valores de UCS que estão entre 106 e 138 não traz uma grande alteração nos resultados, já que seu maior contraste fica com as bancadas de 5 m, tendo seu valor de FF entre 18 e 24. Nas bancadas com 20 m, temos seus dados tão próximos que se torna quase que impossível de diferenciá-los, ficando com FF igual a 6.

Para as bancadas com 50 m, os valores de FF se mostram 2 e 2,67. Essa diferença, apesar de baixa, poderia gerar problemas se estes se tornarem menor que 2, ou encontrarem juntas e falhas nas regiões ou uma maior concentração das tensões. Quando se analisa estas com 100 m, os dados de FF se estabelecem igual a 2, mas repete o que ocorreu nas rochas com 20 m, onde sua simulação nos entrega resultados muito próximo entre si.

Se aplicarmos a equação 15 para obtenção do FS, e assim verificar se a sua correlação é adequada para rochas silicáticas, ao se utilizar o resultado encontrado na figura 48, onde o valor de FF é igual a 2, seu respectivo dado de FS seria de 15,3, que é muito próximo do valor encontrado na figura 49, indicando uma boa correlação encontrada para equação de rochas graníticas.

Visando validar a teoria, onde se demonstra mais eficaz a utilização da técnica de tensão deformação para este tipo de rocha, será analisado mais um maciço rochoso, onde a descontinuidade que se encontra visível é uma fratura de alívio de tensão, que se formou devido ao seu decapeamento ao longo das idades geológicas, já que esta acompanha a topografia da rocha em questão como pode ser observado na figura 51 a seguir.

Exemplos como esse, ressalta a importância de se avaliar a estabilidade desse talude devido as suas alturas elevadas, que ao desestabilizarem podem gerar grandes impactos nas frentes de extração. Os problemas causados por rupturas repentinas não se limitam a acidentes ou perdas de vidas, mas também a atrasos na extração e no atendimento ao cliente que reduzem o rendimento e impedem o bom andamento das operações.

Devido a esse impacto, os problemas operacionais e de segurança acaba refletindo nos custos do projeto. Isso pode ser previsto na fase inicial, o que requer um bom conhecimento das

características geológicas, propriedades geomecânicas e estado de tensão in situ do maciço rochoso.

Figura 51 - Descontinuidade na direção da topografia do maciço.

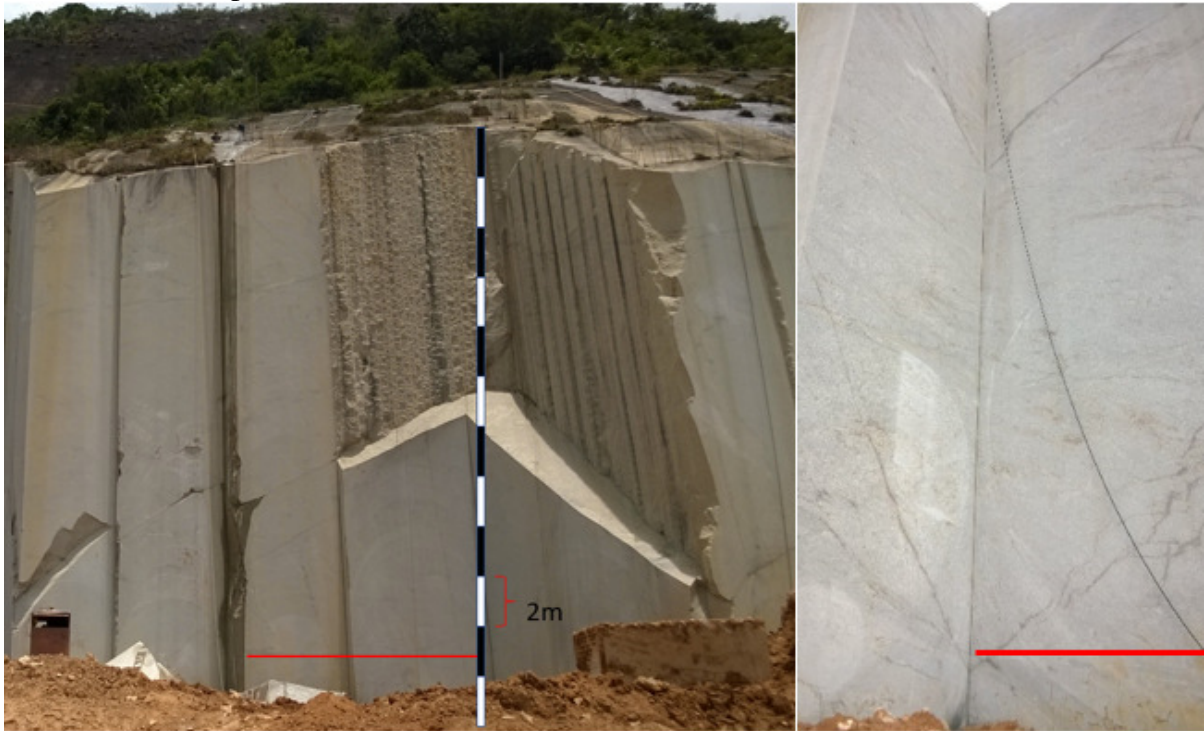


Fonte: Silva et al, 2022

Para se obter as características geomecânicas se faz necessário o conhecimento do RMR, devendo realizar uma *scanline* como observado na figura 52, onde é possível coletar dados de abertura, preenchimento e espaçamento entre as descontinuidades, além de se obter o valor do RQD e para finalizar pode-se obter o valor do UCS por meio do martelo de Schmidt, ou de ensaio de compressão uniaxial simples.

As frentes selecionadas foram o gnaisse amarelo Icaraí com densidade de $2,63 \text{ t/m}^3$ e UCS de $127,2 \text{ MPa}$, e Soft Yellow com densidade de $2,63 \text{ t/m}^3$ e UCS de 142 MPa . Ambas as frentes operam com bancadas ultra-altas variando em altura de 30 m a 50 m . As informações de densidade e compressão uniaxial foram obtidas do Catálogo de Rochas Ornamentais do Espírito Santo (Sardou Filho, 2013), subseção Granitos, e outras informações necessárias são estimadas no software.

Figura 52 - Frente de extração da pedra ornamental Amarelo Icarai à esquerda. À direita, o soft Yellow, onde a linha de varredura de 10m ou mais pode ser vista em vermelho. Para mais detalhes sobre o tipo de rochas, consulte o texto abaixo.



Fonte: Silva et al, 2022

De posse do resultado do RMR, seu valor é aplicado na equação 6 e obtemos o valor do GSI, conforme Tabela 15. O valor da constante de material para rocha intacta (MI) é dado no software para cada tipo de rocha, e o fator de distúrbio de explosão (D) foi aplicado o valor 0,0 porque uma rocha ornamental é pouco ou não perturbada. Para propriedades elásticas, entramos na razão de Poisson, que foi de 0,3 para o granito. O módulo de elasticidade foi de 76000 MPa para granitos, conforme encontrado no trabalho de Vallejo et al., (2002).

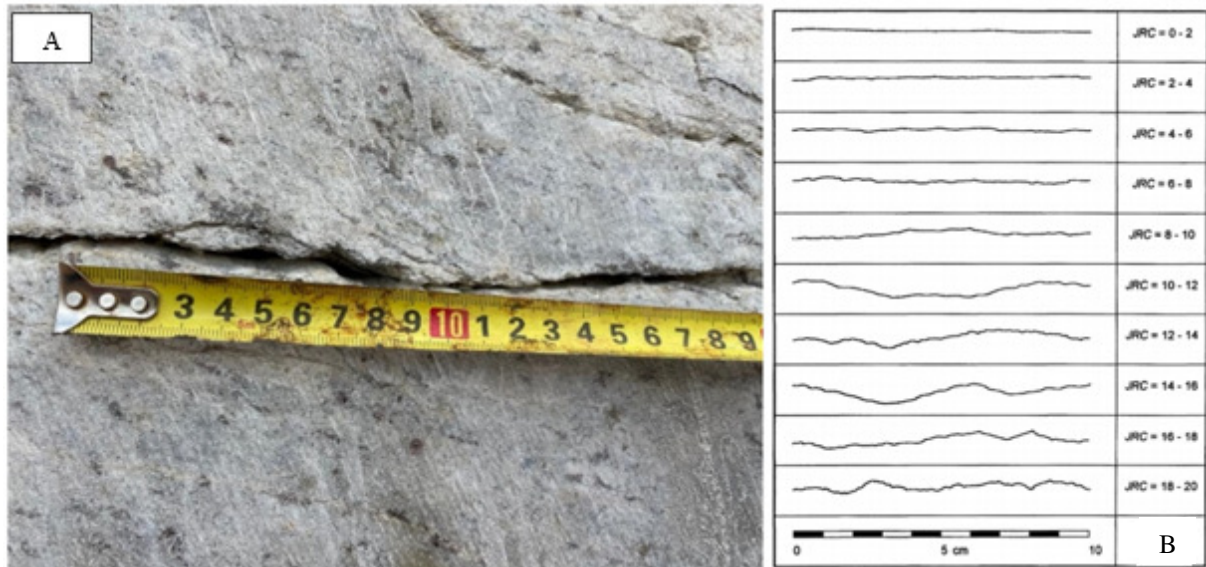
Tabela 15 – Valor do RMR e GSI, calculado por meio da figura 49.

RMR	
Tabela	PESO
1 – UCS	12,00
2 - RQD%	20,00
3 – Espaçamento entre descontinuidades	20,00
4 – Condições das Descontinuidades	30,00
5 – Água no talude	15,00
6 – Direção do talude	-5,00
TOTAL	92,00
GSI	87,00

Fonte: Silva et al, 2022

Já na figura 53 A, podemos observar a descontinuidade fresca, a qual mantém a sua resistência a compressão da superfície (JCS), sendo o seu valor é igual ao do UCS da rocha, e o coeficiente de rugosidade da junta (JRC), determinado pelos perfis criados por Barton ver figura 53 B, sendo a sua superfície bastante rugosa obtendo um valor de 16, segundo os critérios de Barton. A camada de alteração, localizada na parte superior do maciço por falta de ensaios, foi assumida para a simulação com um valor de UCS 15% inferior ao do leito rochoso.

Figura 53 - A) Rugosidade da descontinuidade. B) Perfil de rugosidade de Barton.



Fonte: 3B: Hoek et al. 1998 apud Barton and Choubey, 1977.

Com os dados do UCS em mãos, as informações são inseridas em um software de simulação numérica do tipo Método dos Elementos Finitos (MEF) para determinar o FF associado às bancadas de rochas ornamentais utilizadas no Brasil com alturas entre 30 e 50 m. Para a modelagem e aquisição do fator de resistência foi utilizado o *software RS2*[®], disponível no Laboratório de Mecânica das Rochas do LPM/UFRGS.

Este método é muito utilizado na mecânica das rochas por ser flexível para lidar com materiais heterogêneos e deformabilidade não linear, dá bons resultados quando a matriz de fratura é pequena, e sua malha, que gera uma equação diferencial em cada nó para obtenção dos resultados, comprova ser eficiente, resultando em valores de FF muito próximos aos encontrados no ambiente (Jing e Hudson, 2002).

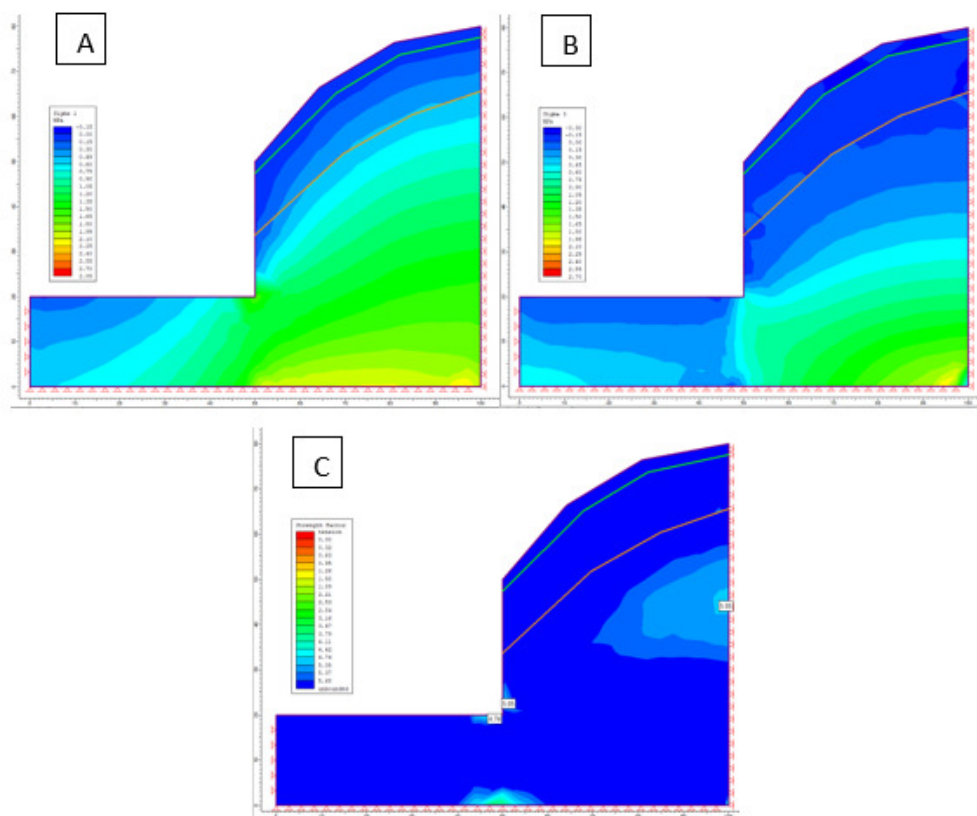
Ao selecionar as duas frentes de extração, foi possível simular no *software RS2*[®] as tensões residuais da rocha e seus efeitos no FF das respectivas bancadas. Nesta simulação foi

utilizada uma topografia semelhante à da frente de lavra para obter os valores mais próximos da realidade nestas pedreiras.

O resultado da simulação para a rocha Icaraí Amarelo, mostrado na Figura 54 A e B, indica que as tensões residuais em σ_1 e σ_3 são uniformemente distribuídas ao longo da bancada. Essa distribuição assume a forma de camadas nas quais as tensões são menores perto da superfície e aumentam com a profundidade.

Com base nesses resultados, vemos que os valores de tensão não se aproximam de 25% do UCS e, portanto, não causam problemas de estabilidade. Além disso, a elevação mais baixa reduz o risco de instabilidade e fratura, já que não há alterações que não afetem a estabilidade do talude. Isso é confirmado na Figura 54 C, onde o menor fator de força encontrado é de 4,74.

Figura 54 - A) Força residual em σ_1 . B) Força residual em σ_3 . C) FF para frente da pedreira, não tendo problema de estabilidade.



Fonte: Silva et al, 2022

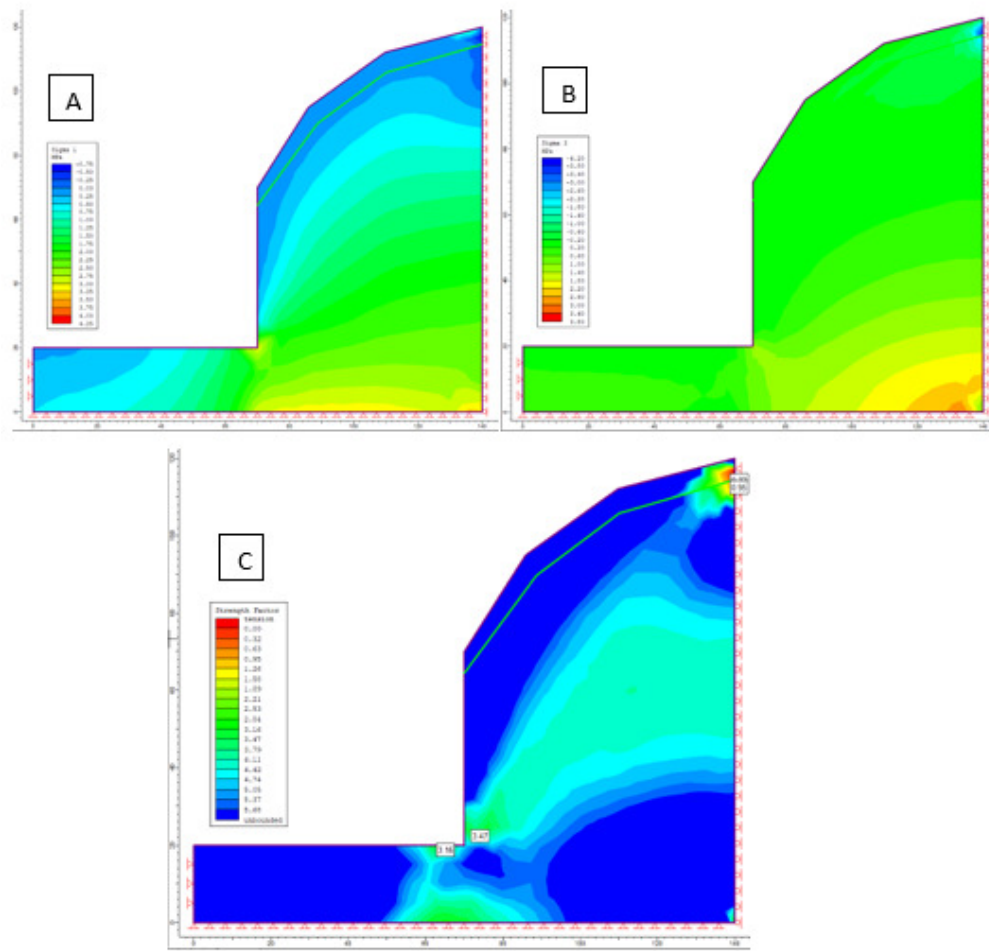
Se observarmos maior tensão na base do banco, apesar de apresentar um fator de força de 4,74, devemos ter uma melhor atenção a essa região. Pois se a rocha for plástica, ela tende a

se deformar neste ponto. No topo do maciço não temos problemas de estabilidade para esta altura, pois os valores de FF são superiores a 5.

A parte superior de um banco é extremamente complexa, pois sua quebra leva ao escorregamento e, conseqüentemente, a acidentes graves e até mesmo fatais. O monitoramento dessa camada intemperizada é de extrema importância, pois qualquer sinal de risco nessa área deve provocar o tombamento da área conforme programado para evitar a ocorrência de acidentes.

O resultado da simulação apresentada na figura 55 A e B, para a rocha Soft Yellow, mostra que a distribuição das tensões residuais se comporta como na outra situação já apresentada no trabalho, alterando apenas os valores encontrados para a mesma ao longo do maciço rochoso. Porém, por ter uma altura mais elevada em relação à simulação anterior, vemos que os resultados encontrados são maiores para as tensões e menores para o FF.

Figura 55 - A) Força residual em σ_1 . B) Força residual em σ_3 . C) FF para frente da pedreira, não tendo problema de estabilidade.



No caso dessa rocha, o fator de resistência, quando apresenta seus resultados mais baixos no contato da superfície de alteração com a rocha, com valor inferior a 1, indica uma possível quebra do talude na parte superior. Já na base da bancada, o valor de FF fica em torno de 3 e não requer maior atenção nessa região, conforme mostra a Figura 55 C. A principal diferença entre os dois maciços está em seu UCS e em sua altura, pois quando todos os outros parâmetros permanecem iguais na simulação, observamos a ocorrência de instabilidade em sua camada de alteração.

A rocha Soft Yellow tem um valor de UCS mais alto, mas há problemas de estabilidade no topo para bancadas de 50 m de altura ou mais. Esses resultados mudam à medida que essa altura muda, quanto menor, mais seguro e quanto maior, mais inseguro.

A região com menor valor de FF é o topo da rocha, onde se encontra a camada de alteração, essa pode gerar problemas de estabilidade. Essa sofre com o intemperismo, reduzindo a sua resistência e possibilitando assim abertura de trincas e causando o deslocamento do material como pode ser observada na figura 56.

Figura 56 - Em vermelho, a região da descamação, onde foi necessário tratamento para evitar a queda do material.



O método utilizado para lavra de pedra neste caso é o de meia encosta, onde o trabalho se inicia mais próximo do topo do batólito. Assim, constatou-se que as tensões residuais não influenciam diretamente no fator de segurança, mas a qualidade da rocha com seu GSI e alturas de bancada possuem maior influência.

Os valores das tensões principais residuais inferiores a 4,0 MPa são considerados muito baixos, conforme pode ser observado nas simulações. Em comparação com a resistência da rocha no teste de compressão uniaxial (onde foi obtido o menor valor de UCS de 127,2 MPa), isso dificilmente afetará os resultados de estabilidade da rocha.

Apesar disso, as empresas não fazem investigações mais profundas no maciço antes do início da extração. Eles optam por começar mais perto do topo, pois a rocha é mais fácil de trabalhar do ponto de vista deles, mas também podem começar mais perto da base.

Se os trabalhos de lavra fossem executados no sentido de alongamento da rocha (esse é o sentido que a rocha sofrerá menos com o alívio de tensões), poderia assim maximizar o seu volume de extração, já que a rocha sofre menos com este tipo de situação.

5.3.2 Rochas Carbonáticas

A frente escolhida para este estudo é constituída por mármore branco clássico, como observado na figura 57, tendo seu valor de densidade de 2,85 t/m³ e UCS de 86,4 MPa, nessa frente os trabalhos são desenvolvidos em bancadas altas com alturas superiores a 20 m. Para a determinação do GSI, foi inicialmente realizado uma scanline nas frentes de trabalho e em seguida foi aplicado o RMR obtendo o valor de 87. Este resultado foi aplicado à equação 6 e foi obtido o GSI com valor de 82, como mostrado na tabela 16.

Os valores de MI é o parâmetro de rocha intacta, que é correspondente a propriedades geotécnicas das rochas, o mesmo encontra-se tabelado no software para rocha do tipo mármore, e o fator de dano no desmonte (D) foi-se aplicado o valor 0.0, pois uma rocha ornamental tem pouca ou nenhuma perturbação.

Figura 57 - Frente de extração da pedreira de rocha ornamental, onde pode ser observado a *scanline* em vermelho.



Fonte: Silva et al, 2022

Segundo Vallejo et al., (2002), o valor do Poisson para rochas do tipo mármore é de 0,23, e podemos obter o modulo de elasticidade desta rocha, por meio da equação 4, que correlaciona esse dado com o RMR já encontrado para esta rocha, sendo assim foi encontrado 84.000 MPa.

Tabela 16 - Valor do RMR, calculado por meio da figura 54.

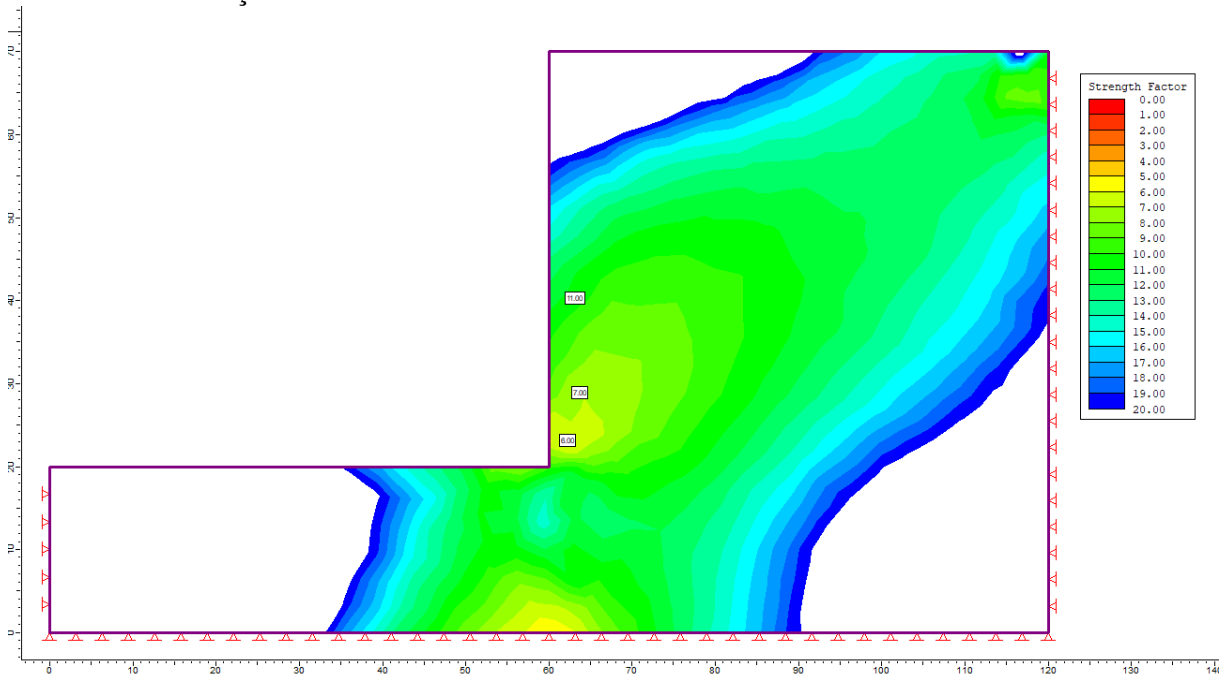
RMR	Peso
Tabela	
1 - Resist. A comp. Uniaxial	7,00
2 - RQD%	20,00
3 - Espaçamento das descontinuidades	20,00
4 - Condição das descontinuidades	30,00
5 - Ação da água	15,00
6 - Direção do Mergulho	- 5,00
TOTAL	87,00
GSI	82,00

As informações foram inseridas em um *software* que utiliza o método de elemento finito - MEF, para determinar o FF associado as bancadas de rocha ornamental. Através deste, são simulados os fatores de força para as alturas de bancadas utilizadas no Brasil. Para esta modelagem, foi utilizado o *software* RS2®, que se encontra disponível no Laboratório de Mecânica de Rochas do LPM da UFRGS.

O fator de força é dado pela razão entre a resistência a compressão do maciço rochoso e as tensões induzidas em cada ponto. Para estimar com certa confiabilidade os parâmetros dos maciços rochosos, foi empregado o critério geral de ruptura de Hoek-Brown. A rocha em questão foi classificada como plástica e o desenho da bancada ficou livre para movimento em X e Y no topo, em sua frente e em seu piso.

Ao analisarmos o talude em questão, verificamos que estes se mantêm estável, tendo o seu FF em 6 como observado na figura 58. As rochas ornamentais do tipo mármore apresentam bons índices que quando aplicados nas simulações se mostram estáveis, exceto quando estas apresentam juntas ou outros problemas. A rocha estudada em questão tem seus valores semelhantes ao de rochas intactas e a região que apresentam menor valor de sua estabilidade no pé da bancada.

Figura 58 - Valores de FS simulados em software de MEF, que determinam a segurança dos trabalhos de extração.



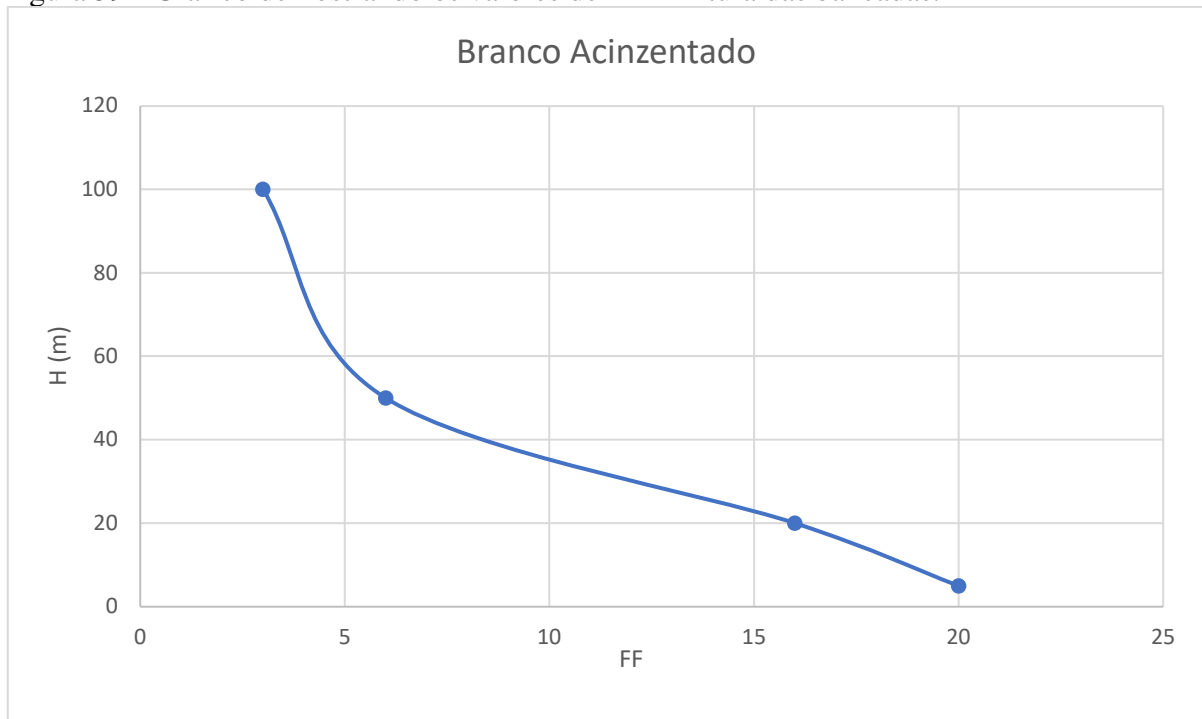
Fonte: Silva et al, 2022

Esse valor reduzido no pé da bancada é devido à redistribuição das tensões. Na maioria das extrações de rocha ornamental estas tensões são redistribuídas durante o processo de escavação, tendendo a criar um acúmulo de forças nesta região, mas devido aos seus bons índices de resistência e qualidade, o maciço rochoso tende a não apresentar problemas de estabilidade.

Essa redistribuição das tensões tem uma direção preferencial, como pode ser observado na figura 59. Nesta direção os valores de FF são inferiores aos valores obtidos na borda da mesma, fica claro que as colorações vermelho ao amarelo são para valores menores e as colorações de verde a azul são os valores de segurança maiores.

O comportamento dos valores de FF, para as alturas simuladas, pode ser visto na figura 59, onde é possível verificar como esta decresce com o aumento da altura da bancada, indicando assim que, quanto maior o talude, menor será o seu fator de força. Estes podem prejudicar o modelo de extração, já que as empresas tendem a manter seus taludes cada vez mais elevados, para aproveitar o material carbonático como corretivo agrícola.

Figura 59 - Gráfico demonstrando os valores de FF x Altura das bancadas.



Fonte: Silva et al, 2022

Para altura de 5 m obtivemos um valor de FF igual a 20, isso quer dizer que com essa altura o talude em questão tem uma tendência de estabilidade não gerando riscos aos presentes

na frente de extração. Com a elevação da altura para 20 m encontramos o valor de 16, que também por ser muito elevado, todos se encontram em segurança, já na altura de 50 m, o resultado de 6 foi encontrado para o fator de força.

Este ainda é considerado muito elevado quando compara a 1, deixando todos da frente de extração seguros quanto a estabilidade do mesmo, quando vemos alturas com 100 m, valor de FF se reduz pela metade, mas ainda, sim, garante a segurança do local de trabalho.

Como nossa simulação levou em consideração um talude sem a presença de juntas, estas podem interferir no equilíbrio do talude, mas é típico desta região realizar desmontes com utilização de explosivos em setores em que a rocha não é passível de ser aproveitada como rocha ornamental, aproveitando este material como corretivo agrícola. Os desmontes realizados neste tipo de maciço não obedecem às melhores práticas do mercado, como observado durante visitas à frente de extração.

Esse tipo de prática, quando não acontece de forma adequada, gera, na face do respectivo maciço, trincas provenientes de *overbrakes*, como pode ser observado na figura 60. Essas trincas aumentam significativamente o risco de acidentes devido à queda de blocos, nesta etapa do método de extração, pois muitas dessas trincas formam pequenos blocos na frente do escavado, levando grande risco às pessoas que trabalham no local, sendo necessário, trabalhos específicos para evitar estes riscos.

Devido ao grande número de trincas causadas pelo desmonte de rochas de forma inadequada, dificulta se obter nestas regiões específicas um bom trabalho de estabilidade de taludes, sendo necessário o auxílio de novas ferramentas tecnológicas para este tipo de trabalho. Essas ferramentas passam pela utilização de drones captando imagens com alta resolução e criando um modelo topográfico adequado, além de softwares para obtenção de dados das descontinuidades.

Após se gerar este modelo, é possível, com a utilização de softwares específicos, coletar os valores de direção e mergulho destas fraturas e só então realizar uma análise probabilística ou determinística de estabilidade destes blocos advindos da utilização inadequada de explosivos neste maciço, sendo necessário um estudo muito criterioso para avaliar e adequar essas operações.

Figura 60 - Região com desmonte recente onde é possível observar blocos soltos no talude.



Fonte: Silva et al, 2022

Qualquer alteração encontrada no talude rochoso deve ser considerada na simulação, pois estas podem criar zonas de fraquezas nas rochas expondo os trabalhadores ao risco de queda de blocos, logo deve-se sempre criar a simulação o mais próximo possível da realidade encontrada na frente de extração e no seu domínio (região exclusiva de trabalho).

5.4 MODELO DE DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO DE EXTRAÇÃO

A rocha utilizada nesta etapa é o Preto São Marcos, que fica situada no município de Casserengue no estado da Paraíba. Esse é um material que pode ser considerada isotrópica e homogênea, mas devido a mesma ser cortada por uma zona de cisalhamento, tem-se bastante famílias de fraturas distribuídas ao do maciço rochoso, em direções diversas como já apontados pelos *Dips* e *Dips Direction* apresentados.

De posse dos valores de *Dips* e *Dips Direction*, os mesmos foram inseridos no *software Dips da Rocscience*, foi possível analisar a direção e mergulho de todas as 12 juntas coletadas, possibilitando uma análise probabilística da estabilidade dos taludes da mesma, assim pode-se optar por utilizar o diagrama de rosetas e identificar a direção de atuação da tensão principal como podemos observar na figura 61.

Figura 61 - Diagrama de Rosetas obtidos por meio do *software dips* e frente de extração do preto são marco obtido no *Google earth*.



Fonte: Autor, 2022.

Após se obter a imagem no *Dips*, foi realizada uma busca no *Google Earth* localizando a pedra do preto São Marcos, na frente de extração reduziu-se um pouco a transparência do

diagrama de roseta e as duas imagens foram sobrepostas, de modo a verificar se a direção praticada pela empresa coincide com os dados encontrados. Ao fazer essa análise verificou-se que a extração ocorre na direção alongante da rocha.

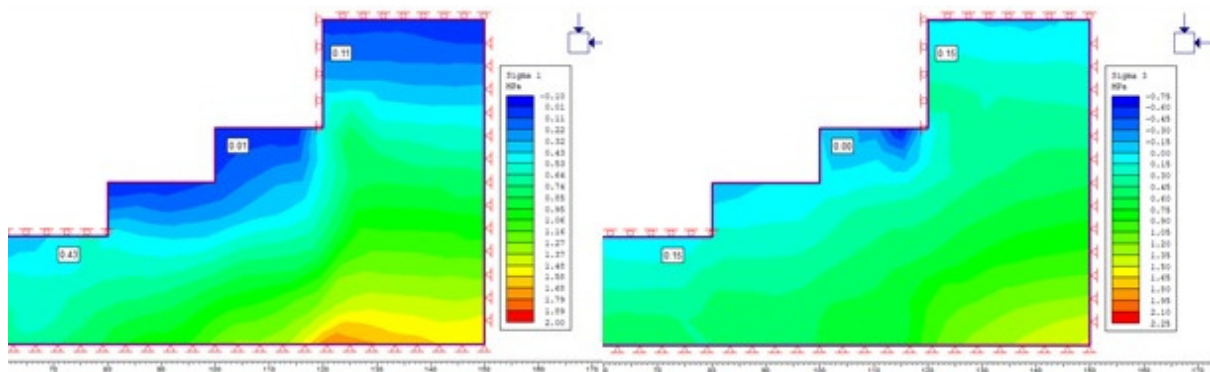
A direção de σ_1 , observável no diagrama de rosetas, que ficou entre 250 a 260 Az, possibilita uma melhor compreensão do sentido de avanço da frente de extração, pois está sempre deve seguir paralela a maior tensão aplicada na rocha, que seria a face alongante da mesma, já que se optarmos por uma extração na perpendicular aumentaríamos as regiões de fraquezas da mesma, fazendo com que aumente o número de trincas pelo alívio das tensões.

A extração na direção alongante potencializa a extração da rocha ornamental, já que reduz sua quebra, aumentando sua recuperação, ficando a limitação da rocha ornamental apenas para o seu padrão de extração que caracteriza o aproveitamento da mesma.

Essa análise demonstra que, uma pesquisa geotécnica adequada possibilita uma otimização da frente de extração reduzindo a perda de material por alívio de tensão, assim como um melhor dimensionamento dos parâmetros de segurança para extração como, por exemplo, altura da banca, ângulo da face e o risco de tombamento de material rochoso no topo da bancada.

Ao utilizar o *software RS2* é possível verificar os valores da tensão residual σ_1 atuando na banca em questão, assim como a tensão residual σ_3 como observado na figura 62, confirmando a análise realizada no diagrama de rosetas. Nesta é verificado que a bancada na direção alongante se torna adequada já que os maiores valores das forças que se encontram atuando se encontram no piso que continua confinado.

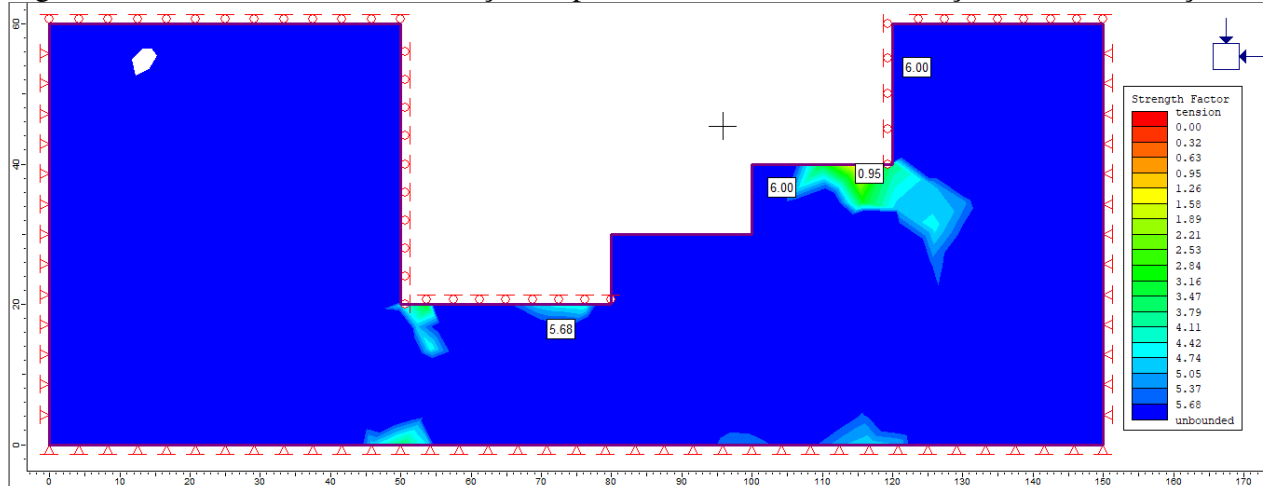
Figura 62 - A esquerda comportamento de σ_1 atuando na frente de extração, já na figura da direita temos os valores de σ_3 .



Fonte: Autor, 2022

Os valores das tensões residuais, são menores que o da resistência à compressão uniaxial encontrado nos ensaios, sendo assim esse não deve apresentar problemas para o método de extração escolhido de múltiplas bancas com alturas de aproximadamente 10 m, não encontrando problemas de estabilidade, ou risco de rompimento do mesmo, para isso continuamos a observar a simulação no *software RS2* que confirma essa teoria, como pode ser observado na figura 63.

Figura 63 - Modelo da frente de extração do preto São Marcos, com avaliação do fator de força.



Fonte: Autor, 2022

Ao analisar a figura em questão, é possível observar que no topo das bancadas não se tem problema com relação à estabilidade, encontrando um maior risco do fator de segurança no pé das mesmas, não ocasionando risco de quebra do talude, já que com o avanço da frente de extração este é removido rapidamente formando novos taludes, não dando tempo de aberturas de trincas no topo dos bancos.

Uma forma de aumentar o resultado do fator de força, é elevar a altura do talude, pois assim a mesma terá uma superfície maior para redistribuir as tensões, melhorando o valor de FF, evitando possíveis riscos no pé da bancada caso a mesma fique paralisada por um tempo maior que o de costume.

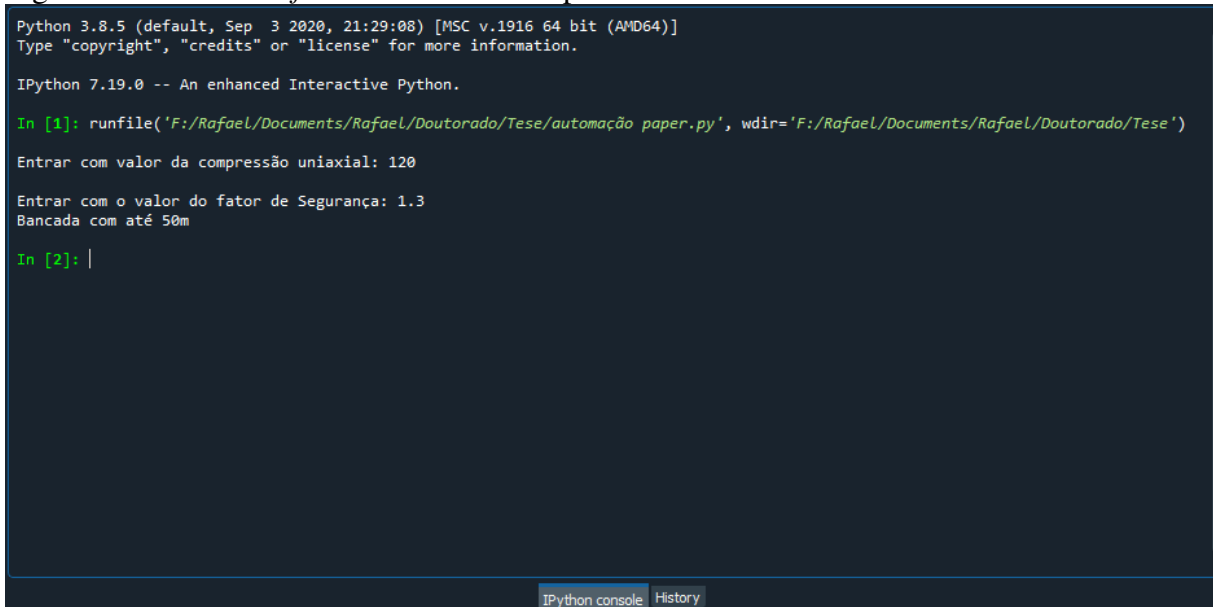
Essa otimização dos métodos de extração, possibilita uma maior eficiência das pedreiras de rochas ornamentais, melhorando sua recuperação e reduzindo os riscos inerentes ao modelo de extração, evitando assim alguns acidentes. A busca por uma melhor redistribuição das tensões residuais, é de grande importância para garantir essa eficiência e algumas vezes uma bancada com altura mais elevada é suficiente para tornar essa distribuição mais adequada ao modelo de extração.

5.5 MODELO DE SOFTWARE

Durante o estudo foi possível criar um modelo teórico que utiliza um GSI de 84, possibilitando na maioria das vezes uma estimativa subestimada dos resultados. Com esses valores foi criado um *script* em linguagem de programação python 3.5, que é uma das linguagens que mais estão se desenvolvendo com possibilidade de integração entre diversas plataformas.

Com os resultados obtidos por meio de análise numérica para as rochas silicáticas, foi elaborado um software que se encontra na fase *backend*, onde este solicita o valor de compressão uniaxial da rocha (UCS) e em seguida o fator de segurança almejado pelo operador do software, com isso ele vai rodar o *script* e nos fornece qual o melhor valor de altura de bancada para essa configuração, como podemos ver na figura 64.

Figura 64 – Tela do *software* desenvolvido para este trabalho.



```

Python 3.8.5 (default, Sep 3 2020, 21:29:08) [MSC v.1916 64 bit (AMD64)]
Type "copyright", "credits" or "license()" for more information.

IPython 7.19.0 -- An enhanced Interactive Python.

In [1]: runfile('F:/Rafael/Documents/Rafael/Doutorado/Tese/automação paper.py', wdir='F:/Rafael/Documents/Rafael/Doutorado/Tese')

Entrar com valor da compressão uniaxial: 120

Entrar com o valor do fator de Segurança: 1.3
Bancada com até 50m

In [2]: |
  
```

Fonte: Autor, 2022.

A fase de *backend* é menos amigável para os usuários, sendo necessário o desenvolvimento da parte *frontend* desta aplicação tornando mais amigável. A elaboração deste software deve orientar e ajudar as pessoas, na melhor escolha de configuração da altura de bancadas de rochas ornamentais, mantendo assim uma segurança nas operações mesmo quando

o engenheiro responsável não estiver presente ou tiver pouca experiência na solução destes problemas específicos.

Um segundo *script* foi desenvolvido, visando orientar os mesmos usuários no que diz respeito a direção alongante do maciço, facilitando a escolha da direção de extração, buscando maximizar a recuperação desta rocha, essa aplicação solicita do usuário apenas as direções das descontinuidades e nos entregando a resposta do tipo direção alongante é 250 Az, como pode ser observado na figura 65.

Figura 65 – *Script* para indicar a direção alongante das rochas ornamentais.

```
Enter the number of values: 12
Enter DIP value 1: 80
Enter DIP direction value 1: 255
Enter DIP value 2: 90
Enter DIP direction value 2: 355
Enter DIP value 3: 75
Enter DIP direction value 3: 345
Enter DIP value 4: 65
Enter DIP direction value 4: 340
Enter DIP value 5: 90
Enter DIP direction value 5: 245
Enter DIP value 6: 80
Enter DIP direction value 6: 285
Enter DIP value 7: 60
Enter DIP direction value 7: 300
Enter DIP value 8: 55
Enter DIP direction value 8: 275
Enter DIP value 9: 50
Enter DIP direction value 9: 290
Enter DIP value 10: 85
Enter DIP direction value 10: 310
Enter DIP value 11: 85
Enter DIP direction value 11: 340
Enter DIP value 12: 35
Enter DIP direction value 12: 235
Direção alongante: 340
Directions within deviation of +/- 10: ['345', '340', '340']
```

Fonte: Autor, 2022.

Com isso foi criada uma solução simples para interpretar os resultados encontrados, e auxiliar os técnicos na escolha adequada da direção de extração do maciço e na segurança com relação a sua altura. O aplicativo também pode passar por uma integração de softwares já existentes, evitando assim que o usuário tenha de digitar os valores de direção e mergulho das descontinuidades.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, ao longo do trabalho, pode-se observar que a utilização da técnica de elementos finitos é a mais adequada para determinar a estabilidade dos taludes de rochas ornamentais, mesmo que no momento o setor de rochas ornamentais não a utilize, essa técnica consegue prever inclusive a instabilidade da zona de capeamento do maciço, tendo uma melhor aproximação de seus resultados, com a realidade encontrada nas empresas de rochas ornamentais.

Também foi possível observar que os procedimentos para escolha do GSI de forma mais confiável, deve se passar por uma análise geotécnica adequada, podendo assim analisar a matriz do maciço e em seguida classificá-lo geotecnicamente. Esse valor escolhido de forma inadequada, pode indicar um talude estável, mais o mesmo se encontrar instável, tendo grande potencial de danos à vida e equipamentos.

Na análise geotécnica é importante avaliar as principais famílias de descontinuidades, pois estas vão interferir na qualidade da matriz rochosa bem como no equilíbrio do talude rochoso, pois em uma análise probabilística está pode indicar uma possível situação de instabilidade deste material.

A análise destas descontinuidades possibilitada o encontro da direção da tensão principal e da tensão secundária, e com este valor conseguimos determinar o sentido da direção trincante que se encontra na mesma da tensão secundária e a alongante que é a mesma da tensão primária, a escolha adequada desta permite maximizar a recuperação das pedreiras de RO, principalmente as que se encontram em regiões de cisalhamento.

Foi observado que o valor do fator de segurança reduz com a elevação das alturas das bancadas, assim como com a redução da qualidade geotécnica do maciço. Porém, bancadas muito baixas tendem a concentrar uma maior quantidade de tensões residuais em sua base, e alturas um pouco mais elevadas tendem a distribuir melhor essas forças, já que esta é uma relação direta entre força e inversa entre área.

Com essas informações foi possível criar um software que avalia o valor de UCS das rochas, as suas alturas e o valor de FS, logo foi possível determinar que rochas silicáticas com valor de UCS inferior a 100 MPa, não devem ultrapassar os 50m. Com valores de 125 MPa, não devem ultrapassar os 60m e rochas com 150 MPa, não podem chegar aos 90m. As demais podem trabalhar em qualquer altura.

Sendo assim também é possível determinar uma nova classificação das alturas de bancadas de rochas ornamentais, que hoje é baixa com 5 m, alta com até 20 m e ultra altas a partir de 20 m. Mas diante deste trabalho é possível sugerir que estas se alterem para baixas 5 m, médias até 20 m, altas até 50 m e ultra altas acima de 50 m.

Sugestão para próximos trabalhos seria de correlacionar os valores de GSI de diversas rochas ornamentais do país com as alturas de 5, 20, 50 e 100 m de alturas para se obter valores de segurança mais adequados, pois foi observado durante este trabalho que está seria uma melhor correlação ao invés de correlacioná-los com o valor de UCS, assim como utilizar equipamentos para medir as tensões residuais dos maciços de rochas ornamentais in-situ, verificando o real impacto na simulação de estabilidade de taludes de rochas ornamentais.

REFERÊNCIAS

- BIENIAWSKI, Z.T. Engineering classification of joint rock mass. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 11, n. 5, p. 98, 1974.
- BIENIAWSKI, Z. T. Exploration for rock engineering. In: **proceedings of the symposium on exploration for rock engineering**. Cape town, South Africa: A.A. Balkema, 1976.
- BIENIAWSKI, Z. T. The goemechanics classification in rock engineering aplications. In: **proceedings of the 4th ISRM congress**. International Society for rock mechanics, 1979.
- BIENIAWSKI, Z.T. **Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1989. 215p
- BRADY, B. H. G. BROWN, E. T. **Rock Mechanics for underground mining**. 3º Ed. Springer Science e Business Media. USA. 2005.
- CARVALHO, J. F. S. Estudo de fracturação de um maciço rochoso granítico para uma possível implementação de pedreira de rocha ornamental. **Dissertação para obtenção do grau de mestre**. Universidade do Porto. Porto, 2010.
- CASTRO, N. F. FREIRE, L. C. Segurança e Saúde na produção de Rochas Ornamentais. em: **Anais do IX Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste** [Internet]; 10-13 de abril; João Pessoa, Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1985>.
- CHIODI FILHO, C. **O setor brasileiro de rochas ornamentais**. Brasília: ABIROCHAS, 2019.
- CHIODI FILHO, C. **Balanco das exportações brasileiras de materiais rochosos naturais e artificiais de ornamentação e revestimento em 2021**. Brasília, ABIROCHAS, 2022.
- CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo, oficina de textos, 2017.
- FIORI, A.P. WANDRESEN, R. **Tensões e deformações em geologia**. São Paulo, Oficina de Textos, 2014.
- FOSSEN, H. **Geologia Estrutural**. São Paulo, Oficina de texto, 2012.
- FRASCÁ, M. H. B. O. Assessment of alterability of basalt used for riprap by petrographic examination. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 1, p. 208-213, 2019.
- GIORGIO, D. D. KOPPE, J. C. QUADROS, T. KLEIN, S. LEITE, J. F. C. Análise estrutural no planejamento de lavra de rocha ornamental. **Revista Escola de Minas**, V. 56, E. 3, p 175-179, 2003.
- HENCHER, S. **Practical Rock Mechanics**. CRC Press, UK and Halcrow, 2015.

HOEK, E. TORRES, C. C. CORKUM, B. Hoek – Brown failure Criterion – 2002 Edition. In: NORTH AMERICAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 5.,2002, Toronto. **Proceedings** [...]. Ontario: University Toronto, 2002. V. 1, p. 267-273.

HOEK, E. MARINOS, P. A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. **Soils and Rocks**, v. 2, p. 1-13, nov 2007.

HOEK, E. BROWN, E. T. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11 n. 3, p. 445–463, 2019.

JING, L. HUDSON, J. A. Numerical methods in rock mechanics. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. V. 39, p. 409-427, 2002.

LIMA, M. A. B. SPISILA, A. L. MENDES, V. A. Atlas de rochas ornamentais dos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e Alagoas. Brasília, CPRM, 2017.

MAIOR, G. R. S. Estabilidade de maciços rochosos para lavra de granitos com bancadas ultra altas. em: **Anais do IX Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste** [Internet]; 10-13 de abril; João Pessoa, Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1985>.

MARQUES, E.A.G.; VARGAS JUNIOR, E.A. **Mecânica das Rochas**. Cubatão: Oficina de Textos, 2022.

MENEZES, R.G. Tecnologia de lavra em maciço rochoso. Rio de Janeiro, 2005

MINISTÉRIO DA PREVIDÊNCIA SOCIAL. Quantidade de acidentes do trabalho, por situação do registro e motivo, segundo a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), no estado do Espírito Santo - 2019/2021. 2023. Disponível em: www.gov.br. Acessado em: 06/09/2023.

MONTANI, C. **XXXII Rapporto Marmo e Pietre nel mondo 2021**. Aldus Casa di Edizioni in Carrara. Carrara, Italy. 2021.

OSINERGMIN - ORGANISMO SUPERVISOR DE LA INVERSIÓN EN ENERGIA Y MINERIA (Perú). **Guía de criterios geomecánicos para diseño, construcción, supervisión y cierre de labores subterráneas**. Lima, Inversiones Iakob S.A.C., 2017.

PEITER, C. C. FILHO, C. C. CARANASSIOS, A. VIDAL, F. W. H. ALBUQUERQUE, G. S. C. FERREIRA, G. E. Rochas Ornamentais no Século XXI: Bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Rio de Janeiro, CETEM/ABIROCHAS, 2001.

PUERTO, J. A. C. **Manual de Geología Estructural: Guía para la interpretación y elaboración de Mapas Geológicos**. Editora Guadalupe Ltda, Bogotá, Colombia, 2004.

READ, J. STACEY, P. **Guidelines for open pit slope design**. Australia: CSIRO, 2009.

SALAMUNI, E. Notas de aula geologia estrutural, UFPR, 2013.

SANTOS, E. J.; FERREIRA, C. A.; SILVA JUNIOR, J. M. F. *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba*. CPRM, Recife, 2002.

SANTOS, R. B. **Estética e Aplicabilidade do Material Pétreo Preto São Marcos**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, UFPE, Recife, 2012.

SARDOU FILHO, R. MENDES, G. M. M. IZA, V. A. FIGUEIREDO, E. R. H. **Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo**. Brasília: CPRM; 2013. 349p.

SILVA, R. F. **ANÁLISE DA METODOLOGIA DE DERRUBADA DE BANCADAS ULTRA-ALTAS POR MEIO DE RUPTURA BASAL EM CUNHA**. 2018. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral, Engenharia de Minas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

SILVA, R. F. NOVAES, R. C. FAZÔLO, H. P. VOLPASSO, J. S. MAIOR, G. R. S. Avaliação comparativa de método de extração de bancadas altas e ultra altas, no estado do espírito santo. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, [S.L], v.16, n. 3, p. 402-406, 2019.

SILVA, R. F. **Análise da metodologia de tombamento de bancadas ultra altas: Utilizando ruptura basal em cunha**. Mauritius. Novas Edições Acadêmicas, 2020.

SILVA, R. F. ZINGANO, A. C. LIMA, R. R. SILVA, J. P. HOLANDA, C. C. Influence of geomechanical analysis on the stability of ornamental rock slopes. *Journal of South American Earth Sciences* V. 116, p. 103859. 2022.

TEIXEIRA W, FAIRCHILD TR, TOLEDO MCM, TAIOLI F. **Decifrando a terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional; 2009. 623 p

VALLEJO, L. I. G. FERRER, M. ORTUÑO, L. OTEO, C. **Ingeniería Geológica**. Madrid: Pearson Educación, 2002.

VIDAL, F. W. H. AZEVEDO, H. C. A. CASTRO, N. F. **Tecnologia de rochas ornamentais: Pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 700p

VIEIRA, V. S.; SILVA, M. A.; CORRÊA, T. R.; LOPES, N. H. B. Mapa geológico do estado do Espírito Santo, CPRM, 2018. (Acessado em <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15564> na data 14-05-2020).

WYLLIE, D. C. MAH, C. W. **Rock Slope Engineering. Civil and Mining**. 4th edition, New York: Taylor & Francis, 2004. 456p.

ZERFASS, H. CHEMALE JUNIOR, F. *Geologia Estrutural em ambiente rúptil: fundamentos físicos, mecânica de fraturas e sistema de falhas naturais*. **Terra e Didática**. 7(2), 75-85, 2011.