



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS CRATEÚS
CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

DANILO JOSÉ DA SILVA

**MAPEAMENTO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE
UM CORTE DE ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM - CE**

CRATEÚS – CE
2022

DANILO JOSÉ DA SILVA

MAPEAMENTO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM
CORTE DE ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM - CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará – Campus Crateús, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.

CRATEÚS – CE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S579m Silva, Danilo José da.
Mapeamento estrutural e análise de estabilidade de taludes de um corte de estrada no município de Boa Viagem - CE / Danilo José da Silva. – 2023.
156 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva.
1. Riscos geológicos . 2. Mapeamento geológico-geotécnico . 3. Análise de estabilidade de taludes . 4. Critério de ruptura . 5. Tipos de rupturas . I. Título.

CDD 622

DANILO JOSÉ DA SILVA

MAPEAMENTO ESTRUTURAL E ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE UM
CORTE DE ESTRADA NO MUNICÍPIO DE BOA VIAGEM - CE

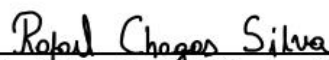
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal do Ceará – Campus Crateús, como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em: 20/12/2022.

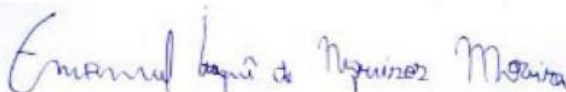
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Francisco Diones Oliveira Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Me. Rafael Chagas Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Me. Emanuel Itaque de Negreiros Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Vera e Bastião que sempre me apoiaram nessa missão rumo ao sucesso.

“Toda a história do mundo se resume no fato de que, quando as nações são fortes, nem sempre são justas, e quando desejam ser justas, não são mais fortes.” (Winston S. Churchill, WW2 event).

RESUMO

Em estudos de estabilidade de massas rochosas é de fundamental importância o conhecimento sobre as estruturas geológicas presentes no maciço rochoso, pois as mesmas terão domínio nas condições de estabilidade ou instabilidade do talude rochoso. Com o bom mapeamento geológico-geotécnico do maciço é possível avaliar o grau de risco geológico com o emprego de ferramentas computacionais. Esses softwares alinhados a um bom modelo matemático de ruptura que mais se adequa ao ambiente do estudo, são as melhores formas de avaliar o risco de ruptura do talude e propor possíveis soluções para garantir a estabilidade do maciço. Dessa forma, o presente trabalho tem como objeto realizar o mapeamento estrutural de três seções definidas em dois taludes de um corte de estrada e analisar a condição de estabilidade com emprego de ferramentas computacionais a partir de dados obtidos em campo dessas seções. A metodologia dividiu-se em quatro etapas para uma melhor organização do estudo, sendo que cada etapa é complementar e dependente da anterior. A primeira etapa foi o mapeamento geológico-geotécnico das três seções, posteriormente a segunda etapa visou a realização das análises cinemáticas-probabilísticas em função das orientações das descontinuidades presentes nas três seções, com a identificação das descontinuidades críticas para um dado tipo de ruptura, a terceira etapa se direcionou para as análises determinísticas, objetivando a obtenção do fator de segurança, por fim, a quarta etapa conduziu para as análises de sensibilidade, tencionando a avaliação da variabilidade de parâmetros geométricos e geomecânicos obtidos no estudo. A partir dos resultados obtidos nas análises cinemáticas-probabilísticas, detectou-se condições para ruptura planar apenas na seção TS1 e condições para ruptura em cunha e tombamento do bloco direto e oblíquo em todas as seções, com probabilidades de ruptura bastante variáveis, já para as análises determinísticas das descontinuidades críticas, tiveram como resultados fatores de segurança bem maiores que um, garantindo assim a estabilidade, mas ao avaliar a influência da porcentagem da saturação da água nas análises de sensibilidade, foi possível atestar uma grande influência na redução da resistência ao cisalhamento com o aumento da saturação do talude. Por fim, conclui-se que a realização de análises combinadas entre softwares, como foi o caso desse estudo, direcionam para uma melhor interpretação do estado crítico do talude.

Palavras-chave: Estruturas geológicas. Descontinuidades críticas. Tipos de rupturas.

ABSTRACT

In rock mass stability studies, it is of fundamental importance to know the geological structures present in the rock mass, because they will dominate the stability or instability conditions of the rock slope. With a good geological-geotechnical mapping of the rock mass it is possible to evaluate the geological risk level using computational tools. These softwares aligned with a good mathematical model of rupture that best fits the study environment are the best ways to assess the risk of slope rupture and propose possible solutions to ensure rock mass stability. Thus, this paper aims to perform the structural mapping of three sections defined in two road section slopes and to analyze the stability condition using computational tools based on field data obtained from these sections. The methodology was divided into four stages for a better organization of the study, with each stage complementary and dependent on the previous one. The first step was the geological-geotechnical mapping of the three sections, then the second step aimed to perform the kinematic-probabilistic analysis according to the orientation of the discontinuities present in the three sections, with the identification of critical discontinuities for a given type of rupture, the third step was directed to the deterministic analysis, aiming to obtain the safety factor, finally, the fourth step led to the sensitivity analysis, intending to evaluate the variability of geometric and geomechanical parameters obtained in the study. From the results obtained in the kinematic-probabilistic analyses, it was detected conditions for planar rupture only in section TS1 and conditions for wedge rupture and direct and oblique block tumbling in all sections, with very variable rupture probabilities, as for the deterministic analyses of the critical discontinuities, The results of the deterministic analyses of the critical discontinuities showed safety factors greater than one, thus ensuring stability, but when evaluating the influence of the percentage of water saturation in the sensitivity analyses, it was possible to attest a great influence on the reduction of shear strength with increasing slope saturation. Finally, it can be concluded that performing combined analyses between software, as was the case in this study, leads to a better interpretation of the slope's critical state.

Keywords: Geological structures. Critical discontinuities. Rupture types.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Elementos básicos de um Talude.....	24
Figura 2 - Transições de fases na rocha.....	26
Figura 3 - Orientação das fraturas em relação aos esforços	28
Figura 4 - Deslocamento normal (A), transcorrente (B) e inversa (C).....	29
Figura 5 - Aspectos geométricos presentes em dobras cilíndricas e não cilíndricas.....	30
Figura 6 - Tipos de acamamentos e unidades deposicionais.....	32
Figura 7 - Clivagem (A), Xistosidade, (B) e Bandamento (C).....	33
Figura 8 - Forma de medição do strike, dip e dip direction.....	35
Figura 9 - Persistência das descontinuidades	36
Figura 10 - Perfis padrões identificados em descontinuidades rugosas	38
Figura 11 - Perfil de abertura em uma descontinuidade.....	38
Figura 12 - Preenchimento favorecendo a estabilidade (A) e preenchimento favorecendo o deslocamento (B).....	44
Figura 13 - Geometria de uma ruptura planar	49
Figura 14 - Martelo de Schmidt mecânico (A) e Martelo de Schmidt digital (B).....	53
Figura 15 - Relação entre σ_1' e σ_3' com base no critério de Hoek-Brown Generalizado e Mohr-Coulomb.....	56
Figura 16 - Carta de classificação GSI.....	57
Figura 17 - Ruptura planar e sentido do plano de deslizamento em relação a direção do talude.....	60
Figura 18 - Representação das variáveis para análise cinemática de ruptura planar no estereograma.....	61
Figura 19 - Análise de ruptura planar no Software RocPlane da Rocscience	62
Figura 20 - Ruptura em cunha e direção do deslizamento da cunha em relação a direção do talude.....	62
Figura 21 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura em cunha no estereograma	63
Figura 22 - Análise de ruptura em cunha no Software SWedge da Rocscience	64
Figura 23 - Ruptura circular, direção de deslizamento e padrão disperso das descontinuidades.....	65
Figura 24 - Seção do talude, individualização de uma fatia e variáveis geométricas para análise via método de Bishop Simplificado.....	66

Figura 25 - Análise de ruptura circular no Software Slide2 da Rocscience	67
Figura 26 - Ruptura por tombamento e forma geométrica dos blocos com inclinação contrária à do talude.....	67
Figura 27 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo em um estereograma	69
Figura 28 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura por tombamento por flexão em um estereograma	70
Figura 29 - Análise de ruptura por tombamento no Software Slide da Rocscience	71
Figura 30 - Corte de estrada na BR-020	72
Figura 31 - Mapa de localização da área de estudo	72
Figura 32 - Seção TS1 do talude sudeste.....	73
Figura 33 - Seção TS2 do talude sudeste.....	74
Figura 34 - Seção TS3 do talude noroeste	74
Figura 35 - Materiais empregados no estudo.....	76
Figura 36 - Litologia e características da superfície do talude sudeste para as seções TS1 e TS2	81
Figura 37 - Litologia e características da superfície do talude noroeste para a seção TS3	82
Figura 38 - Taludes remanescentes sudeste e noroeste com visualização dos desvios nos furos, perturbação no maciço rochoso e características estruturais	83
Figura 39 - Procedimento adotado em campo para a medição do dip (A) e dip direction (B). 84	
Figura 40 - Condições de intemperismo e preenchimento em TS1, TS2 e TS3	88
Figura 41 - Visualização da condição de infiltração, famílias de discontinuidades e forma dos blocos nas seções TS1, TS2 e TS3	89
Figura 42 - Procedimento empregado para medição do rebote com emprego do Martelo de Schmidt.....	90
Figura 43 - Cortes por serra mármore das amostras dos taludes sudeste e noroeste e pó das rochas extraídas dessas amostras	92
Figura 44 - Passo a passo do procedimento empregado para o ensaio de densidade por picnometria.....	93
Figura 45 - GSI das seções	94
Figura 46 - Fator de distúrbio das seções TS1, TS2 e TS3	95
Figura 47 - Projeção estereográfica da seção TS1.....	98
Figura 48 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS1	99

Figura 49 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS1	100
Figura 50 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar seção na TS1	100
Figura 51 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	101
Figura 52 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	102
Figura 53 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	102
Figura 54 - Projeção dos planos e polos das discontinuidades na seção TS1	103
Figura 55 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	104
Figura 56 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1	104
Figura 57 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	105
Figura 58 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1	105
Figura 59 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	106
Figura 60 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1	106
Figura 61 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura planar na seção TS1	108
Figura 62 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS1	109
Figura 63 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS1	109
Figura 64 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	110
Figura 65 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	111

Figura 66 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1	111
Figura 67 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS1	112
Figura 68 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	113
Figura 69 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	114
Figura 70 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo seção na TS1	114
Figura 71 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1	115
Figura 72 - Projeção estereográfica da seção TS2.....	116
Figura 73- Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS2.....	116
Figura 74 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS2.....	117
Figura 75 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS2.....	117
Figura 76 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS2	118
Figura 77 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS2	119
Figura 78 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2	119
Figura 79 - Projeção dos planos das discontinuidades na seção TS2	120
Figura 80 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2.....	121
Figura 81 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2.....	121
Figura 82 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2.....	122
Figura 83 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2.....	122

Figura 84 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2.....	123
Figura 85 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2.....	123
Figura 86 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS2	125
Figura 87 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2	126
Figura 88 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2.....	126
Figura 89 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS2	127
Figura 90 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2	128
Figura 91 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2.....	129
Figura 92 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2.....	129
Figura 93 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2.....	130
Figura 94 - Projeção estereográfica da seção TS3.....	131
Figura 95 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS3.....	131
Figura 96 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS3.....	132
Figura 97 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS3.....	132
Figura 98 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS3	133
Figura 99 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS3	134
Figura 100 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3	134
Figura 101 - Projeção dos planos das discontinuidades na seção TS3	135

Figura 102 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3.....	136
Figura 103 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3.....	136
Figura 104 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3.....	137
Figura 105 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2.....	137
Figura 106 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3.....	138
Figura 107 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3.....	138
Figura 108 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS3.....	140
Figura 109 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3	141
Figura 110 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3	141
Figura 111 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS3	142
Figura 112 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3	143
Figura 113 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3.....	144
Figura 114 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3.....	144
Figura 115 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da persistência	36
Tabela 2 - Classificação das aberturas no maciço rochoso	39
Tabela 3 - Classificação do espaçamento	40
Tabela 4 - Classificação do tamanho dos blocos	47
Tabela 5 - Orientação das descontinuidades na seção TS1	84
Tabela 6 - Orientação das descontinuidades na seção TS2	84
Tabela 6 - Orientação das descontinuidades na seção TS2	85
Tabela 7 - Orientação das descontinuidades na seção TS3	85
Tabela 8 - Valores de rebote da seção TS1	90
Tabela 9 - Valores de rebote da seção TS2	91
Tabela 10 - Valores de rebote da seção TS3	91
Tabela 11 - Valores obtidos para o cálculo da densidade, a densidades para os três ensaios e a densidade média do talude sudeste	93
Tabela 12 - Valores obtidos para o cálculo da densidade, a densidades para os três ensaios e a densidade média do talude noroeste	93
Tabela 13 - Interseções presentes na seção avaliada	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação da alteração da parede	41
Quadro 2 - Classificação da resistência de rochas e solos.....	42
Quadro 2 - Classificação da resistência de rochas e solos.....	43
Quadro 3 - Classificação do preenchimento das descontinuidades.....	44
Quadro 4 - Designação e classificação das descontinuidades	45
Quadro 5 - Classificação do maciço rochoso	46
Quadro 6 - Sugestões para o fator de distúrbio D.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
FS	Fator de segurança
PR	Probabilidade de ruptura
GSI	Índice de resistência geológica
TS1	Talude seção 1
TS2	Talude seção 2
TS3	Talude seção 3

LISTA DE SÍMBOLOS

L_1	Altura
L_2	Comprimento
L	Comprimento médio
H'	Constante
m	Constante
Ψ	Ângulo de mergulho médio das descontinuidades
N''	Número total de descontinuidades em uma área
N_c	Número de descontinuidades que estão contidas na área
N_t	Número de descontinuidades que cortam a área em ambas as extremidades
S	Espaçamento
S_{apar}	Espaçamento aparente
θ	Ângulo da descontinuidade
FS	Fator de segurança
τ_s	Tensão de cisalhamento resistiva
τ_m	Tensão de cisalhamento mobilizadora
τ	Resistência ao cisalhamento
c'	Coesão
σ'	Tensão normal
ϕ'	Ângulo de atrito interno
A	Área da descontinuidade
ψ_p	Inclinação da descontinuidade
h	Altura da descontinuidade
W	Força peso
b	Distância horizontal entre a crista do talude e a projeção da extremidade superior da descontinuidade no topo do talude
γ	Peso específico do solo ou rocha
ψ_f	Inclinação da face do talude
ψ_s	Inclinação do topo do talude
PR	Probabilidade de ruptura
M	Número de descontinuidades presentes na zona crítica
N	Número de descontinuidades totais

H_r	Número do rebote
σ_{ci}	Resistência à compressão uniaxial
H_{rN}	Martelo tipo N
H_{rL}	Martelos tipo L
H_D	Rebote medido no martelo digital
H_r	Rebote convencional
σ'_1	Maior esforço
σ'_3	Menor esforço
m_b	Constante
m_i	Constante do material
s	Constante
a	Constante
GSI	Índice de resistência geológica
D	Fator de distúrbio
τ'	Resistência ao cisalhamento do maciço rochoso
σ'_{3max}	Menor esforço máximo
σ'_{1max}	Maior esforço mínimo
σ'_{cm}	Resistência do maciço rochoso
H	Altura do talude
$d\sigma'_1$	Diferencial tensão máxima
$d\sigma'_3$	Diferencial tensão mínima
σ'_{3n}	Razão entre menor esforço máximo e resistência à compressão uniaxial
ψ_p	Inclinação da base
Δ_x	Largura do bloco
y	Altura do bloco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1 Taludes	24
3.1.1 Talude natural	24
3.1.2 Talude artificial	25
3.2 Efeito escala no maciço rochoso	25
3.3 Descontinuidades	27
3.3.1 Fratura	27
3.3.2 Falha	29
3.3.3 Dobra	30
3.3.4 Acamamento sedimentar	31
3.3.5 Foliação metamórfica	32
3.3.6 Outros tipos de descontinuidades	33
3.4 Características geomecânicas das descontinuidades	34
3.4.1 Orientação	35
3.4.2 Persistência	36
3.4.3 Rugosidade	37
3.4.4 Abertura	38
3.4.5 Espaçamento	39
3.4.6 Intemperismo	40
3.4.7 Resistência das paredes	41
3.4.8 Preenchimento	43

3.4.9 Infiltração	44
3.4.10 Famílias de descontinuidades	46
3.4.11 Tamanho ou forma dos blocos	46
3.5 Métodos de análise de estabilidade de taludes	47
3.5.1 Método probabilístico	48
3.5.2 Método determinístico	48
3.5.3 Análise de sensibilidade	51
3.6 Estimativa da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta com uso do martelo de Schmidt	52
3.7 Critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado	54
3.8 Tipos de rupturas	59
3.8.1 Ruptura planar	59
3.8.2 Ruptura em cunha	62
3.8.3 Ruptura circular	64
3.8.4 Ruptura por tombamento	67
3.9 Seleção da área e das seções alvo do estudo	71
4 MATERIAIS E MÉTODOS	75
4.1 Materiais	75
4.2 Métodos	76
4.2.1 Mapeamento geológico-geotécnico	76
4.2.2 Projeção estereográfica e análise cinemática-probabilística	77
4.2.3 Análise determinística	78
4.2.4 Análise de sensibilidade	78
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1 Mapeamento geológico-geotécnico	80
5.1.1 Descrição geológica	80
5.1.2 Descrição geomecânica	82

5.1.3 Critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado	89
5.2 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS1	98
5.3 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS1	107
5.4 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS2	115
5.5 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS2	124
5.6 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS3	130
5.7 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS3	139
6 CONCLUSÃO	146
REFERÊNCIAS	149
ANEXO A – Correção do rebote para martelos de Schmidt do tipo L	152
ANEXO B – Correção do rebote para martelos de Schmidt do tipo N	153
ANEXO C – Valores de <i>m_i</i> para rocha intacta	154

1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de estruturas geológicas em taludes de rocha é considerado a melhor forma de avaliar as condições de estabilidade de massas rochosas. Diferentemente de solos, onde o tamanho dos grãos e a coesão são fatores importantes, em rochas, as características geológicas e geotécnicas das descontinuidades são fatores que governam os parâmetros de estabilidade. Amaral (2019) considera que o estudo de estabilidade de taludes abrange diversas áreas, mas com um foco em mineração e obras civis. Na mineração, os taludes são construídos em bancadas, inter-rampa, barragens de rejeito, pilhas de estéril e de rejeito. Já em obras civis, os taludes se concentram em cortes rodoviários, ferroviários, aterros e taludes de usinas hidrelétricas.

Um conceito importante antes da realização de estudos de estabilidade de massas rochosas é o de risco geológico. Freire *et al.* (2018) classificam como um estudo das geociências que se direciona para a possibilidade de ocorrências de acidentes, ou em função de um fato já ter ocorrido, onde foi possível registrar consequência sociais e econômicas, em razão de fatores tais como: movimentos de massa, feições erosivas, enchente, inundação, etc. Em muitos casos, é possível notar que a junção desses fatores foram responsáveis por diversas tragédias ao longo dos últimos anos.

Na mineração e obras civis, os taludes mais comuns são artificiais, ou seja, são criados pelo homem, sendo necessário um estudo completo da rocha a ser escavada, seja pela adoção de um método mecanizado ou com uso de explosivos. As perturbações na rocha irão existir e, dependendo do arranjo das tensões após as perturbações direcionadas na massa rochosa e das condições de orientação espacial das estruturas em função de uma inclinação adotada, poderão conduzir para o movimento de um dado volume de rocha sobre a face livre do talude (WYLLIE, 2018).

Em estudos de estabilidade de maciços rochosos, a avaliação do grau de risco pode ser feita em termos de probabilidade de ruptura ou fator de segurança. Sendo esse último mais preciso, pois leva em consideração as propriedades geométricas e geomecânicas do talude, adotando um fator numérico que é associado a uma condição de instabilidade ou estabilidade para a massa de solo ou rocha. Já o primeiro, considera apenas a orientação das descontinuidades críticas e do talude em função do ângulo de atrito interno do material, para direcionar a probabilidade de ruptura em relação à seção avaliada. Em ambos os estudos, a adoção de um modelo matemático de ruptura para as rochas, será o fator chave para o sucesso

na avaliação dos taludes já existentes, e dimensionamento de condições de estabilidade a serem adotadas na obra (WYLLIE, 2018).

A adoção de ferramentas computacionais para análises de estabilidade de taludes vem crescendo nos últimos anos, devido à dificuldade de trabalho com modelos matemáticos de ruptura. Esses softwares são programados em função das metodologias efetivas e podem ser atualizados ao surgimento de novas técnicas ou aperfeiçoamento das já existentes. Destinam-se a diminuir bastante o tempo de obtenção dos resultados, pois os usuários não lidarão com as equações matemáticas dos critérios de ruptura, que são bastante complexas e de cálculo oneroso, necessitando apenas da seleção cuidadosa do método e da inserção dos mesmos dados que são necessários, caso o cálculo fosse feito de forma manual.

A área alvo do estudo é um corte de estrada da BR-020, no município de Boa Viagem, no estado do Ceará. A metodologia do trabalho propôs a divisão do mesmo em quatro etapas, sendo elas o mapeamento geológico-geotécnico, projeção estereográfica e análise cinemática-probabilística, análise determinística e análise de sensibilidade.

Portanto, a justificativa para o presente trabalho é que a aplicação de metodologias cinemática-probabilística e determinística para avaliação das condições de estabilidade em taludes de corte de estrada que geram um elevado risco de perdas materiais e humanas, a partir de dados obtidos em campo na etapa de mapeamento geológico-geotécnico e o processamento desses dados em ferramentas computacionais, que empregam critérios de ruptura para uma melhor obtenção dos esforços atuantes na rocha, direcionam para níveis bastante confiáveis nos resultados alcançados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar o mapeamento estrutural de três seções definidas em dois taludes de um corte de estrada e analisar a condição de estabilidade com emprego de ferramentas computacionais a partir de dados obtidos em campo dessas seções.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar em campo o valor do GSI, fator de distúrbio e resistência da rocha para composição dos parâmetros do critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado;
- Examinar a probabilidade de falha das seções através de análises cinemáticas-probabilísticas por projeção estereográfica e identificar a partir dessas análises as discontinuidades que favoreçam para um ou mais de um tipo de ruptura no talude rochoso;
- Avaliar via análise determinística o fator de segurança para os tipos de rupturas prováveis identificados pelas análises cinemáticas-probabilísticas;
- Dimensionar as condições geométricas e geomecânicas ideais a partir de análises de sensibilidade que garantam a menor probabilidade de falha e o maior fator de segurança.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

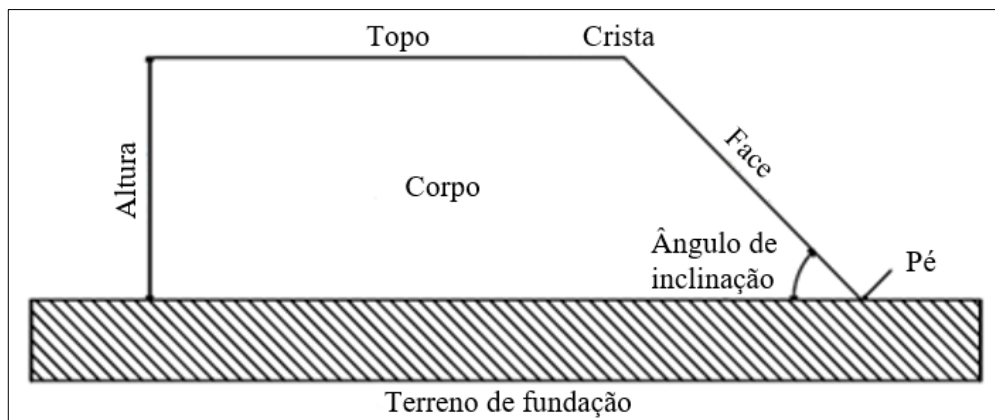
A seguir serão apresentados os fundamentos teóricos utilizados para o mapeamento geológico-geotécnico de taludes em rocha, critério de ruptura e metodologias para avaliação da estabilidade com base em análises probabilísticas, determinísticas e de sensibilidade.

3.1 Taludes

Segundo Gerscovich (2016) talude pode ser definido como qualquer superfície inclinada ao horizonte, composta por uma massa de solo ou rocha, de origem natural, denominado encosta, ou construída pelo homem, por exemplo, os aterros e cortes. Para Caputo (1988) talude é um nome genérico que se compreende quaisquer superfícies inclinadas, que podem limitar um maciço de terra, rocha ou a junção de ambos.

Os elementos básicos que compõem um talude são: crista, pé, corpo, altura, topo, face e ângulo de inclinação. A Figura 1 demonstra esses elementos básicos que compõem um talude e a localização dos mesmos em relação ao terreno de fundação.

Figura 1 - Elementos básicos de um Talude



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.1 Talude natural

Taludes naturais podem ser constituídos de rocha, solo residual ou coluvionar. Os taludes em rocha são materiais naturais consolidados, duros e compactos, que podem ser compostos por um tipo específico de rocha ou várias litologias diferentes, comumente classificados como taludes de maciço rochoso na presença de descontinuidades. Taludes de solo

residual são formados a partir da ação do intemperismo físico e químico na rocha sã (rocha inalterada) que alteram as propriedades geomecânicas da rocha, levando a transformação das camadas superficiais em solo, ficando sempre adjacente a rocha mãe (GERSCOVICH, 2016; CAPUTO, 1988).

Por fim, os taludes de solo coluvionar são formados pela deposição de material heterogêneo, constituído principalmente por fragmentos de rocha de diversos tamanhos, oriundos da ação do transporte, tendo como agente principal a gravidade que leva a deposição dos mesmos no sopé da rocha (GERSCOVICH, 2016; CAPUTO, 1988).

3.1.2 Talude artificial

Os taludes artificiais são construídos pela ação humana, sendo estes resultados de cortes em encostas naturais, escavações e lançamento de material para formação de aterros e pilhas. Os cortes e escavações em encostas naturais podem ser executados com ação mecânica ou com uso de explosivos, devendo estes seguir uma altura e inclinação adequada para que possa ser garantido a estabilidade da obra (GERSCOVICH, 2016).

Os aterros são obras que visam a implantação de estruturas civis, e devem ser empregados quando o solo da fundação possuir baixa capacidade de suporte ou quando o foco é o nivelamento do terreno. Já as pilhas são formadas pela estocagem de solo, rocha ou rejeitos de usinas de beneficiamento mineral em grandes áreas, tendo os taludes que compõem a pilha, altura, comprimento e inclinação que favoreçam a estabilidade (GERSCOVICH, 2016).

3.2 Efeito escala no maciço rochoso

Na avaliação de um talude em rocha é muito comum observar a presença de várias famílias de descontinuidades, logo a abordagem para análise da estabilidade pode se tornar bastante complexa, se comparado a um talude com a presença de apenas uma família de descontinuidade. Quando se possui apenas um tipo característico de descontinuidade na rocha é possível avaliar a ruptura por cisalhamento com base nessa descontinuidade, mas ao envolver vários tipos e diversas famílias a abordagem da estabilidade será bastante influenciada pela geologia estrutural do maciço rochoso (READ; STACEY, 2010).

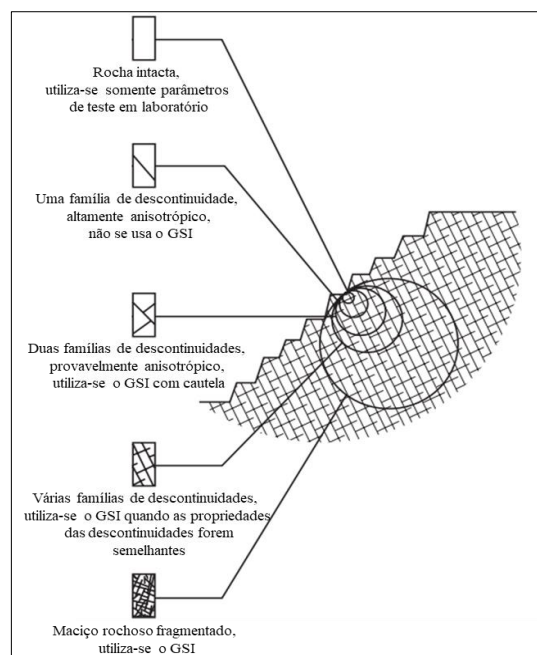
Segundo Wyllie (2018) a determinação de valores confiáveis de resistência ao cisalhamento é a parte mais crítica de um projeto de talude, pois pequenas mudanças nessa resistência podem influenciar diretamente na altura e ângulo da face que garantam segurança.

Logo, a escolha de valores adequados dependerá da disponibilidade de amostras extraídas em campo para testes laboratoriais, além de uma boa interpretação visual do maciço rochoso.

A maioria dos testes laboratoriais são executados em amostras muito pequenas e obtidas de porções mais competentes da rocha, conduzindo para uma variabilidade dos valores de resistência. Para esse caso, o efeito escala no maciço deve ser sempre considerado quando vários planos de fraqueza estiverem presentes na rocha, pois com o aumento nas dimensões da obra do talude, haverá um aumento na presença de descontinuidades que influenciarão na resistência da rocha. Em uma escala menor de descontinuidades, a resistência da rocha pode ser obtida apenas considerando as propriedades da rocha intacta (READ; STACEY, 2010).

A Figura 2 demonstra a transição da rocha intacta para o aparecimento de descontinuidades até alcançar a classificação de maciço rochoso com o aumento da escala do talude.

Figura 2 - Transições de fases na rocha



Fonte: Modificado de Hoek *et al.*, 2013.

Wyllie (2018) destaca essas transições em três classes para avaliação da resistência:

- 1 Rocha intacta: o fator a ser considerado é que a resistência ao cisalhamento pode reduzir-se ao longo da vida útil do talude, devido a ação do intemperismo;
- 2 Descontinuidades: as propriedades das descontinuidades que influenciam na resistência ao cisalhamento do talude serão a rugosidade das paredes, que pode

ser fresca ou intemperizada, e o preenchimento, que pode ser coesivo ou de baixa resistência;

- 3 Maciço rochoso: os fatores que vão influenciar na resistência ao cisalhamento serão a resistência à compressão uniaxial e o ângulo de atrito da rocha intacta, bem como, o espaçamento das descontinuidades e a condição de suas superfícies.

3.3 Descontinuidades

Descontinuidade pode ser definida como um plano de fraqueza na rocha, que a torna descontínua em um dado plano. O material da rocha intacta ao longo do tempo passou por várias influências, desde mecânicas, térmicas e químicas. Tendo esse material deixado de ser uma grande massa de rocha única quase homogênea e isotrópica, para ser formada por blocos heterogêneos e anisotrópicos com propriedades diferentes, que foram submetidos a diversos eventos geológicos em diferentes épocas. O aparecimento de descontinuidades na rocha leva a redução de suas propriedades mecânicas, principalmente, a resistência ao cisalhamento. Nesse caso, a descontinuidade ou conjunto de vários tipos, seja da mesma família ou combinação de outras, passarão a governar a estabilidade da rocha (FIORI, 2015; HUDSON; HARRISON, 1997).

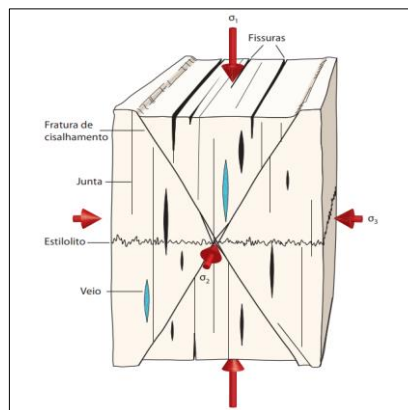
Wyllie (2018) considera que as investigações geológicas-geotécnicas costumam categorizar as descontinuidades em relação a sua formação, pois para cada categoria estrutural é possível observar a semelhança em relação às dimensões e propriedades de resistência. Para Fiori (2015) o sucesso da avaliação da estabilidade de um talude se dará no conhecimento das propriedades da rocha intacta, natureza das descontinuidades, suas extensões, grau de alteração, mineralogia, textura, posição espacial, granulometria e material de preenchimento nas aberturas formadas. A seguir serão apresentadas as principais descontinuidades estruturais encontradas em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

3.3.1 Fratura

Fratura pode ser definida como sendo qualquer descontinuidade plana ou subplana, com uma dada direção delgada em relação às outras, formadas por esforços internos (térmicos ou residual) ou externo (tectonismo). A presença de fraturas na rocha pode levar a redução ou perda da coesão, pois as mesmas levam ao rompimento da rocha em um dado plano levando ao

deslocamento do mesmo em regimes de deformação rúptil, que dependendo da escala pode variar de milímetros a quilômetros. As fraturas podem ser definidas em fraturas de extensão, cisalhamento e contração. A Figura 3 ilustra a orientação desses três tipos de fraturas em relação aos esforços atuantes na rocha. Uma descrição mais detalhada pode ser feita logo abaixo (FOSSSEN, 2018).

Figura 3 - Orientação das fraturas em relação aos esforços



Fonte: Fossen, 2018.

- Fraturas de extensão: desenvolvem-se perpendicularmente à atuação do esforço mínimo, logo se formam em ambientes de baixa pressão confinante e pequenos esforços diferenciais. As principais são: juntas, fissuras e veios. A primeira apresenta pouco ou nenhum deslocamento visível a olho nu, podendo ser classificadas em fraturas estreitas, pois sofrem pequenas magnitudes de deformação. A segunda trata-se de fraturas mais abertas que as juntas, podendo se estender por quilômetros. Por último, os veios que são um tipo particular de fratura extensional preenchida com minerais;
- Fratura de cisalhamento: desenvolvem-se a partir do deslocamento paralelo ao plano de fratura, na maioria das vezes apresentam um ângulo de 20 a 30° em relação ao maior esforço em dadas condições de pressão. Estas fraturas correspondem à parte superior da crosta, podendo também se formar próximo à transição rúptil-dúctil;
- Fraturas de contração: podem ser também classificadas em fraturas de fechamento. Caracterizam-se pelo preenchimento de materiais residuais oriundos da rocha encaixante levando ao fechamento e contração da abertura.

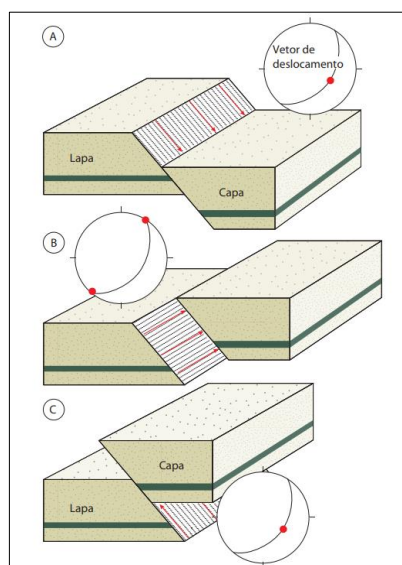
Um exemplo desse tipo de fratura são os estilólitos um tipo de descontinuidade com superfície muito irregular, tendo um aspecto serrilhado ao invés de plano.

3.3.2 Falha

As falhas estão associadas a mecanismos de deformação rúptil, podendo acomodar grandes concentrações de deformação, tornando-se o tipo de descontinuidade mais complexa. Pode ser definida como qualquer superfície visível, onde é possível notar um deslocamento ocasionado pela ação do cisalhamento. A extensão de uma falha pode variar de centímetros a quilômetros, formando também estruturas rúpteis secundárias, além de também formar zonas complexas que envolvem o deslocamento pela ação do cisalhamento e a formação de fraturas, sendo a descontinuidade das falhas o corte na rocha (FOSSSEN, 2018).

Sua geometria pode ser classificada considerando dois tipos de bloco, o bloco superior denominada capa e o bloco inferior denominada lapa. Existem ainda três tipos de deslocamentos, ilustrados na Figura 4. No deslocamento que leva ao rebaixamento da capa, a falha é dita do tipo normal, já em um deslocamento que leva ao soerguimento da capa, a falha é do tipo inversa, por fim um deslocamento lateral em um plano horizontal a falha é do tipo transcorrente. Uma ampla faixa de ângulos de mergulho dos planos de falha pode ser observada em afloramentos, desde ângulos horizontais e verticais. Para um conjunto de falhas subparalelas próximas umas das outras damos o nome de zona de falha (FOSSSEN, 2018).

Figura 4 - Deslocamento normal (A), transcorrente (B) e inversa (C)



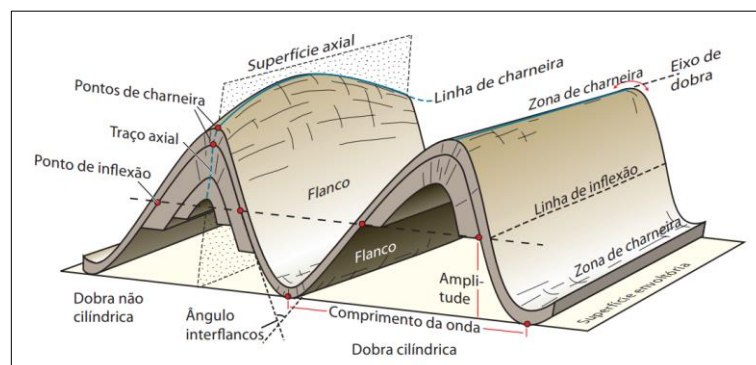
Fonte: Fossen, 2018.

3.3.3 Dobra

As dobras são formadas quando estruturas planas sofrem esforços em um regime de deformação dúctil transformando-se em estruturas curvas. A resposta da rocha a esses esforços leva a uma recepção ativa, passiva e de flexura do acamamento a deformação. O dobramento ativo pode ser considerado como um processo de flambagem, que leva ao encurtamento do plano na direção paralela ao acamamento, tendo as dobras desse tipo, um perfil cilíndrico ao longo de seu comprimento. No dobramento passivo, o acamamento não exerce influência no processo de dobramento, levando a ausência de diferenças reológicas, tendo o cisalhamento simples e puro um papel importante no encurtamento da dobra. Já a flexura pode ocorrer quando as forças agem em um modo distinto da flambagem, tendo o esforço principal uma ação paralela à camada, mas com uma grande dependência das camadas vizinhas (FOSSSEN, 2018).

A forma das dobras segue uma certa similaridade, possuindo uma charneira responsável por ligar os dois flancos que mergulham um contrário ao outro. A curvatura das dobras pode ser do tipo cilíndrica ou não cilíndrica, delimitada pela zona de charneira, além do ponto de máxima curvatura e o ponto de charneira. Por último o traço axial, que representa uma linha de intersecção da superfície axial para a superfície de observação. Esses aspectos geométricos e outros estão presentes na Figura 5, que ilustra tanto para uma dobra do tipo cilíndrica a direita bem como do tipo não cilíndrica à esquerda (FOSSSEN, 2018).

Figura 5 - Aspectos geométricos presentes em dobras cilíndricas e não cilíndricas



Fonte: Fossen, 2018.

3.3.4 Acamamento sedimentar

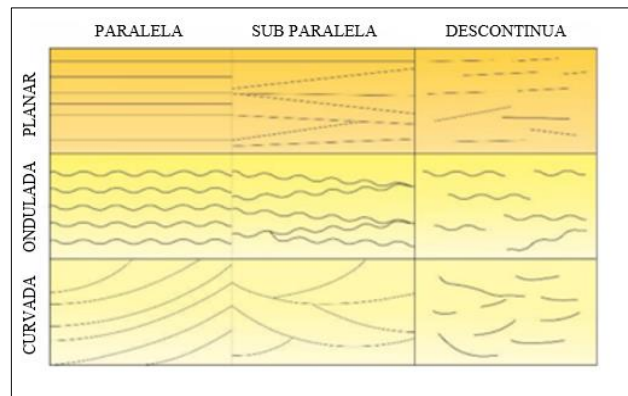
O acamamento sedimentar está relacionado a mudança no padrão de sedimentação. Nos processos de deposição de sedimentos essa mudança é corriqueira, logo um maciço de rocha sedimentar pode possuir várias alterações no tamanho do grão, cor e mineralogia em relação a cada camada de estrato da rocha. Essas camadas podem ter uma espessura quase igual, ou variar muito em relação às outras. A presença de planos de acamamento não é restrita a rochas sedimentares, mas pode também ocorrer em rochas ígneas e metamórficas (SGARBI, 2012).

A superfície de um acamamento sedimentar pode variar dependendo da ação do intemperismo e erosão na face da rocha, podendo estas terem um aspecto plano, ondulado ou curvado, além de uma ou várias camadas serem mais profundas no plano horizontal do que as demais. Para a espessura das camadas a forma de deposição será o fator chave. Em deposição por corrente, a espessura da camada decresce em direção a corrente logo abaixo. Para a sucessão vertical, poderá haver um acréscimo ou decréscimo na espessura das camadas para o topo, podendo ao longo de sua deposição sofrer um aumento ou decréscimo em sua espessura (TUCKER, 2011).

Os tipos de acamamento mais comuns são o plano, ondulado e cruzado. Variam com base na sua unidade deposicional entre paralela, subparalela e descontínua. Na quebra da forma de deposição, levará a caracterização de ambas em uma unidade deposicional descontínua. A Figura 6 ilustra os tipos de acamamentos e unidades deposicionais. Tucker (2011) e Sgarbi (2012) classificam-nos da seguinte forma:

- Acamamento plano: é comum em arenitos com grãos que varia de médio a fino, sendo a segregação desses grãos no processo deposicional o responsável por variar entre paralelo ou não paralelo;
- Acamamento ondulado: referem-se ao aparecimento de ondas na organização dos sedimentos, característico de fluxo deposicional turbulento, podendo formar em siltitos e arenitos;
- Acamamento cruzado: são formadas através da migração de estratos ondulados em um ambiente fluvial ou desértico, sendo estas as estruturas mais indicativas do sentido de fluxo. Ocorre principalmente em arenitos e conglomerados.

Figura 6 - Tipos de acamamentos e unidades deposicionais



Fonte: Modificado de Tucker, 2011.

3.3.5 Foliação metamórfica

As foliações metamórficas são formadas pela orientação paralela ou subparalela de filossilicatos. Essa organização é uma característica dos minerais no metamorfismo que ao serem submetidos a tensões, se organizam para fornecer a menor resistência. As foliações vão ocorrer na maioria das rochas que foram submetidas a metamorfismo regional, podendo a rocha conter mais de um tipo de foliação, dependendo de quantas vezes a mesma foi submetida ao metamorfismo. As características de cada foliação vão depender da rocha original, sendo que, com o aumento da temperatura e pressão direciona para o aumento do crescimento dos minerais (SGARBI, 2012).

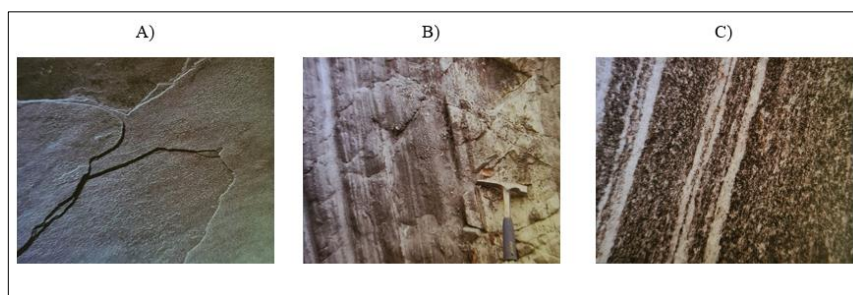
Três tipos de foliação são mais considerados em avaliações estruturais de rochas metamórficas, sendo estas: clivagem, xistosidade e bandamento. Sendo essas representando o aumento do grau de metamorfismo respectivamente. A Figura 7 demonstra esses três tipos de foliações metamórficas. Uma descrição mais detalhada pode ser feita a seguir.

- Clivagem: é um tipo de foliação metamórfica que se forma em ambientes com temperatura inferior a 350°C e baixas pressões. Caracterizam-se pela orientação preferencial de filossilicatos não visíveis a olho nu. As clivagens podem ser classificadas em descontínua e contínua. Clivagem descontínua preserva a textura e características do protólito, possuindo uma orientação mineral muito pequena ou inexistente. Já a clivagem contínua possui uma orientação preferencial dos minerais mais homogêneos com espaçamento muito pequeno. A foliação na clivagem tem influência bastante na orientação

dos minerais presentes em sua matriz rochosa. Os principais minerais tais como argilo-minerais e clorita formam planos que não possuem brilho, orientam-se na direção perpendicular ao maior esforço atuante, sendo facilmente rompidos nesse plano. A ardósia é o principal tipo de rocha com essa foliação;

- Xistosidade: é um tipo de foliação metamórfica desenvolvida em ambientes de temperaturas superiores a 350°C, levando à formação de novos minerais, tais como clorita e muscovita, a partir dos argilominerais das ardósias e filitos. Nesse tipo de foliação os minerais crescem com uma forte orientação preferencial, possuindo um tamanho médio dos cristais maior que os da clivagem, podendo atingir dimensões centimétricas. A forte orientação e tamanho dos cristais resulta em planos com um dado brilho característico. As rochas com esse tipo de foliação são designadas de xisto;
- Bandamento: também denominado bandamento gnáissico. É formada em ambientes de alto grau de metamorfismo, com atuação de altas temperaturas e pressões, que levam à recristalização dos minerais. Esses novos minerais sofrem segregação e desenvolvem texturas na forma de bandas alternadas e descontínuas. As camadas escuras são formadas por minerais máficos (biotita e anfibólio), já as camadas mais claras são formadas por minerais félsicos (quartzo e feldspato). Esse tipo de foliação é característico do gnaiss.

Figura 7 - Clivagem (A), Xistosidade, (B) e Bandamento (C)



Fonte: Modificado de Sgarbi, 2012.

3.3.6 Outros tipos de discontinuidades

Além das principais discontinuidades, Fiori (2015) destaca que as margens de intrusões ígneas, discordâncias, planos de cisalhamento e fendas de tração podem também influenciar nas propriedades de resistência do maciço rochoso, devendo também conhecê-las

para a obtenção de bons resultados na avaliação estrutural de um talude em rocha. Podem ser exemplificadas logo abaixo:

- Margens de intrusões ígneas: cortam o maciço e acamamentos presentes na rocha, sendo essas estruturas ígneas denominadas de diques quando o corte é perpendicular e sills quando o corte é paralelo ou subparalelo as camadas. Por representarem um contato litológico diferente, levam a alteração no entorno com a rocha encaixante, afetando as mesmas. Caso conduzam fluidos hidrotermais, as propriedades geomecânicas serão bastante alteradas;
- Discordâncias: são caracterizadas como superfícies que levam a quebra no processo de sedimentação, oriunda da interferência por erosão ou inclinação desigual em rochas sedimentares. Como são irregulares terão ao longo do maciço, mudanças em sua superfície e inclinação;
- Plano de cisalhamento: é resultado de movimentos rúpteis antigos ou recentes no maciço rochoso. Esses movimentos variam muito em uma dada região e orientação espacial, logo afetam o maciço rochoso caso sofram uma sobrecarga oriunda de atividades civis ou de mineração;
- Fendas de tração: são feições recentes na forma de aberturas verticais inclinadas a uma dada distância da crista do talude, podendo possuir uma abertura milimétrica a centimétrica. Sua simples presença já indica uma precariedade na estabilidade do talude, pois podem favorecer a percolação de água que agirá como força mobilizadora.

3.4 Características geomecânicas das discontinuidades

A Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) descreve que a maioria dos maciços rochosos expostos na superfície, tem seu comportamento redigido pela presença de discontinuidades. Logo é de fundamental importância, que as estruturas do maciço rochoso com base na natureza das discontinuidades, sejam cuidadosamente descritas em relação às litologias presentes no maciço. Para estudos de estabilidade é importante que sejam feitas descrições qualitativas e quantitativas das características presentes nas discontinuidades, tais como: orientação, persistência, rugosidade, abertura, espaçamento, intemperismo, resistência

das paredes, preenchimento, infiltração, famílias de descontinuidades e o tamanho ou forma dos blocos (ISRM, 1978).

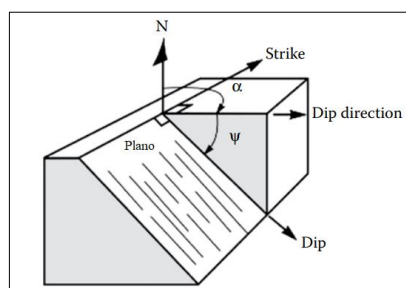
O sucesso nos estudos de estabilidade se dará com uma descrição bastante detalhada dessas características presentes no maciço rochoso. Portanto, com um nível de detalhamento elevado, será possível avaliar e projetar obras de engenharia, com a menor dependência de testes laboratoriais de amostras *in situ*, cujo o método de obtenção dessas amostras é bastante complexo, caro, bem como, de difícil acesso (WYLLIE, 2018, ISRM, 1978). A seguir uma descrição mais detalhada é feita sobre as características geomecânicas das descontinuidades.

3.4.1 Orientação

A orientação consiste em avaliar os valores de direção, mergulho e direção do mergulho das descontinuidades. A direção (azimute ou strike) é o ângulo formado a partir do norte verdadeiro até o plano horizontal da descontinuidade. O mergulho (dip ou plunge) é o ângulo formado entre o plano inclinado da descontinuidade e a horizontal. Enquanto a direção do mergulho (dip direction ou trend) é o ângulo medido entre o norte verdadeiro e a direção do mergulho da descontinuidade (ISRM, 1978). A Figura 8 demonstra como são feitas essas medições em relação ao plano da descontinuidade.

A orientação das descontinuidades é uma medida muito importante em estudos de estabilidade de maciços rochosos, pois a mesma controla em grande parte as condições de instabilidade de massas de rocha, podendo também quantificar a direção e inclinação da ação de deformações excessivas na rocha. Pode ser medida com o auxílio de uma bússola e clinômetro, ou obtida indiretamente com ferramentas de fotogrametria. Em ambos os casos, deve ser medida a declividade magnética no local, para descontar ou adicionar no strike e dip direction a angulação que a leva para a medida em relação ao norte verdadeiro (ISRM, 1978).

Figura 8 - Forma de medição do strike, dip e dip direction

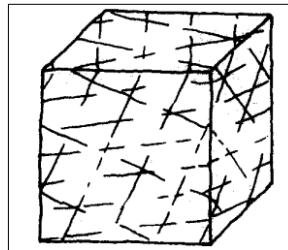


Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

3.4.2 Persistência

A persistência é a medida de extensão ou tamanho das descontinuidades presentes na rocha. Sua quantificação se dá de forma direta, medindo o tamanho do traço na superfície da exposição, com auxílio de uma fita métrica ou de forma indireta, com base em equações que levam em conta uma área de observação no maciço rochoso (ISRM, 1978). A Figura 9 demonstra um bloco de rocha com várias descontinuidades em diversas extensões.

Figura 9 - Persistência das descontinuidades



Fonte: ISRM, 1978.

A persistência é um parâmetro muito importante, pois define junto com o espaçamento o tamanho dos blocos e o comprimento das superfícies potenciais de deslizamento, logo deve ser medida na região de maior influência na estabilidade (ISRM, 1978). A Tabela 1 mostra a classificação da persistência para dados intervalos de comprimento.

Tabela 1 - Classificação da persistência

Classificação	Persistência (m)
Muito pequena	< 1
Pequena	1 – 3
Média	3 – 10
Grande	10 – 20

Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

A persistência não é de fácil medição, sendo considerado o parâmetro geomecânico mais difícil de estimar. Um dos procedimentos indiretos mais empregados foi proposto por Pahl (1981, *apud* WYLLIE, 2018) recomendando considerar uma área de mapeamento com altura (L_1) e comprimento (L_2) para estimativa do comprimento médio (L) com base na equação 3.1.

Sendo que, as constantes (H') e (m) são determinadas com base nas equações 3.2 e 3.3 respectivamente.

$$L = H' \cdot \frac{(1 + m)}{(1 - m)} \quad (3.1)$$

$$H' = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 \cdot \cos \Psi + L_2 \cdot \sin \Psi} \quad (3.2)$$

$$m = \frac{(N_t - N_c)}{(N'' + 1)} \quad (3.3)$$

Na qual (Ψ) é o ângulo de mergulho médio das descontinuidades, (N'') é o número total de descontinuidades na área, (N_c) o número de descontinuidades que estão contidas na área e (N_t) o número de descontinuidades que cortam a área em ambas as extremidades.

3.4.3 Rugosidade

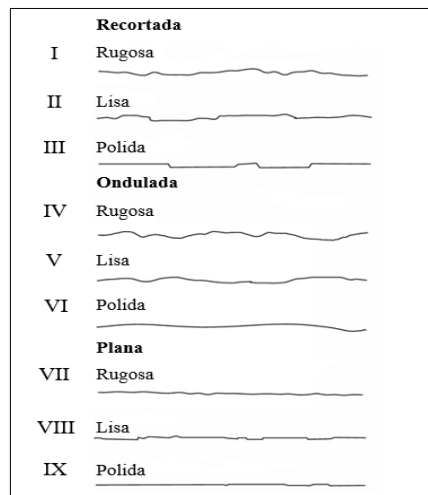
A rugosidade em uma descontinuidade, forma-se nas paredes da mesma, sendo uma das componentes mais importantes em estudos de resistência ao cisalhamento, através de superfícies das paredes com aspereza. Com o aumento da abertura, preenchimento e grau de deslocamento a rugosidade perde sua importância na avaliação de ruptura por cisalhamento na presença de paredes com superfície rugosa (WYLLIE, 2018).

Em uma definição mais abrangente a rugosidade é defendida como uma ondulação ou dilatação nas superfícies das paredes da descontinuidade, que promove resistência ao cisalhamento no deslocamento sobre essa superfície. A resistência das descontinuidades em função da aspereza é diretamente proporcional à resistência da parede da descontinuidade, logo na presença de tensões que favorecem o deslocamento, a superfície áspera pode ser danificada ou não (ISRM, 1978).

A obtenção da resistência ao cisalhamento de descontinuidades rugosas é feita em laboratório para se alcançar dados mais precisos. Em uma escala semiquantitativa, pode ser obtida em campo, a partir da superfície exposta e considerando a direção provável de deslocamento. Na prática, a ondulação na superfície da descontinuidade afeta o deslocamento sobre tensão de cisalhamento, e a irregularidade dessa ondulação afeta a resistência ao

cisalhamento. Caso seja possível reconhecer no maciço a direção potencial de deslocamento, a rugosidade pode ser obtida a partir de perfis padrões (WYLLIE, 2018). A Figura 10 demonstra os perfis padrões identificados em descontinuidades rugosas.

Figura 10 - Perfis padrões identificados em descontinuidades rugosas

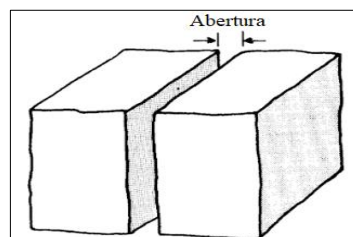


Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

3.4.4 Abertura

Abertura de uma descontinuidade pode ser definida como a distância perpendicular entre as paredes adjacentes, que separa uma parede da outra, preenchida com ar ou água. A Figura 11 ilustra o perfil de abertura em uma descontinuidade. Grandes aberturas podem estar relacionadas a deslocamentos induzidos por cisalhamento, já pequenas aberturas se formam em processos de relaxamento de tensões. As aberturas que mais afetam a estabilidade são as fendas de tração, pois favorecem a percolação de água que reduz a resistência ao cisalhamento (ISRM, 1978).

Figura 11 - Perfil de abertura em uma descontinuidade



Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

A abertura pode ser medida com auxílio de um paquímetro para pequenas distâncias e com uma fita métrica para deslocamentos maiores. Em rochas perturbadas por detonações com explosivos, as aberturas induzidas pela onda de choque não devem ser consideradas, já em testemunhos de sondagem só devem ser medidas se o testemunho tiver uma excelente recuperação e não sofrer perturbações devido ao sistema de rotação da perfuratriz. (ISRM, 1978). A Tabela 2 destaca o aspecto e classificação das aberturas com base no intervalo de deslocamento.

Tabela 2 - Classificação das aberturas no maciço rochoso

Aspecto	Classificação	Abertura
Descontinuidades fechadas	Muito fechada	< 0.1 mm
	Fechada	0.1 – 0.25 mm
	Parcialmente aberta	0.25 – 0.5 mm
Descontinuidades parcialmente abertas	Aberta	0.5 – 2.5 mm
	Moderadamente larga	2.5 – 10 mm
	Larga	> 10 mm
Descontinuidades abertas	Muito larga	1 – 10 cm
	Extremamente larga	10 – 100 cm
	Cavernosa	> 1 m

Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

3.4.5 Espaçamento

Espaçamento é a medida de distância entre uma descontinuidade e outra e, ao lado da persistência, forma o tamanho do bloco de rocha. Blocos de rocha de baixo espaçamento possuem baixa coesão, logo tendem a sofrer deslocamento mais fácil e conduzir para um modo de ruptura circular, enquanto que, blocos de espaçamento mais amplo, levam a formação de intertravamentos, que reduz a possibilidade de deslocamento. A condutividade hidráulica é inversamente proporcional ao espaçamento, em situações de aberturas das descontinuidades quase que constantes (ISRM, 1978). A Tabela 3 traz a classificação do espaçamento adotada com base no espaçamento entre as descontinuidades.

Tabela 3 - Classificação do espaçamento

Classificação	Espaçamento (mm)
Extremamente próximo	< 20
Muito próximo	20 – 60
Próximo	60 – 200
Moderado	200 – 600
Grande	600 - 2000
Muito grande	2000 - 6000
Extremamente grande	> 6000

Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

Para estudos de estabilidade leva-se em consideração que a resistência diminui com a presença de vários blocos de baixo espaçamento. O espaçamento medido diretamente na face do maciço rochoso é um espaçamento relativo e não real, logo induz a um viés, pois as descontinuidades possuem uma inclinação relativa. Para a obtenção do espaçamento real (S) que tende a ser menor que o aparente, considera-se a equação 3.4 proposta por Terzaghi (1965, *apud* WYLLIE, 2018), que leva em conta o espaçamento aparente (S_{apar}) e o ângulo da descontinuidade (θ).

$$S = S_{apar} \cdot \sin \theta \quad (3.4)$$

3.4.6 Intemperismo

O intemperismo atuante nas descontinuidades leva a uma redução na resistência do maciço rochoso, pois além de alterar a superfície da rocha intacta, também altera a superfície das descontinuidades, mesmo em aberturas muito pequenas, como é o caso de juntas. A ação do intemperismo nas paredes das descontinuidades é bastante comum, sendo que, à presença de água ou outros fluidos hidrotermais, leva a uma redução da resistência na superfície das descontinuidades, diminuindo bastante sua resistência ao cisalhamento. Existem três tipos de intemperismo, o físico, químico e biológico, sendo os dois primeiros mais comuns em rochas. (WYLLIE, 2018). O Quadro 1 traz a classificação da alteração da parede com base nas observações de campo do grau de intemperismo atuante na rocha.

Quadro 1 - Classificação da alteração da parede

Classificação	Identificação no campo
Parede sã	Nenhum sinal visível a olho nu de minerais alterados, às vezes observa-se uma leve descoloração na superfície da descontinuidade
Parede levemente alterada	A descoloração e mudança de cor dos minerais sinalizam alterações na superfície das descontinuidades
Parede alterada	Menos da metade do material rochoso está decomposto
Parede muito alterada	Mais da metade do material rochoso está decomposto e/ou desintegrado em solo

Fonte: Maia, 2021.

No intemperismo físico as características naturais da superfície são desintegradas pela ação de agentes físicos, tais como: temperatura, umidade e velocidade do ar. Esse tipo de intemperismo tem uma maior força de atuação em rochas friáveis (baixa resistência) como é o caso de arenitos e argilitos. Já o intemperismo químico faz com que a rocha sofra uma decomposição química, alterando suas propriedades físicas. Processos como oxidação em rochas ricas em ferro, hidratação em feldspatos que se decompõem em caulinita e carbonatação na presença de soluções de calcário, são exemplos de reações que ocorrem na rocha sobre atuação do intemperismo químico (WYLLIE, 2018).

3.4.7 Resistência das paredes

A resistência das paredes das descontinuidades é um dos parâmetros mais importantes a ser considerado na avaliação das mesmas. Essa resistência pode ser medida em termos de compressão, sendo uma das componentes mais importantes na determinação da deformabilidade e resistência ao cisalhamento da rocha, em situações de contato direto entre as paredes, como é o caso das juntas. Um pequeno deslocamento nas paredes de uma junta submetida por tensões de cisalhamento, leva ao atrito entre as mesmas, caso haja uma superfície rugosa essas asperezas serão reduzidas quando as tensões de cisalhamento se aproximarem ou ultrapassarem a resistência do material da parede (ISRM, 1978).

Portanto, a descrição da resistência das paredes de descontinuidades é uma parte essencial na caracterização do grau de alteração, principalmente se a água atua como agente de

intemperismo químico. Essa resistência pode ser estimada com o emprego do martelo geológico. Para uma melhor precisão nos resultados quantitativos em campo, pode ser obtido com o emprego do martelo de Schmidt (WYLLIE, 2018). O Quadro 2 traz a classificação e faixa aproximada de resistência à compressão, para paredes de rocha (R) e solo (S) a partir de testes simples em amostras obtidas em campo.

Quadro 2 - Classificação da resistência de rochas e solos

(continua)

Classificação	Descrição	Identificação de campo	Faixa aproximada de resistência à compressão uniaxial (MPa)
R6	Rocha extremamente resistente	A amostra só pode ser fraturada com martelo geológico	> 250
R5	Rocha muito resistente	A amostra requer muitos golpes de martelo geológico para fraturá-la	100 – 250
R4	Rocha resistente	A amostra requer mais de um golpe de martelo geológico para fraturá-la	50 – 100
R3	Rocha medianamente resistente	A amostra requer um único golpe de martelo geológico para fraturá-la. Não pode ser riscada ou recortada por um canivete	25 – 50
R2	Rocha fraca	Riscos rasos podem ser feitos na amostra com a ponta do martelo geológico. Pode ser riscado com dificuldade por um canivete	5 – 25
R1	Rocha muito fraca	A amostra desintegra-se sob golpes firmes com a ponta do martelo geológico. Pode ser recortada por um canivete	1 – 5
R0	Rocha extremamente fraca	Recortado pela unha	0.25 – 1
S6	Solo duro	Recortado com dificuldade pela unha	> 0.5
S5	Solo muito duro	Facilmente recortado pela unha	0.25 – 0.5
S4	Solo duro	O polegar penetra com uma grande dificuldade	0.1 – 0.25

Quadro 3 - Classificação da resistência de rochas e solos

(conclusão)

Classificação	Descrição	Identificação de campo	Faixa aproximada de resistência à compressão uniaxial (MPa)
S3	Solo medianamente duro	Pode ser penetrado vários centímetros pelo polegar com um esforço moderado	0.05 – 0.1
S2	Solo macio	Facilmente penetrado vários centímetros pelo polegar	0.025 – 0.05
S1	Solo extremamente macio	Facilmente penetrado vários centímetros pela mão	< 0.025

Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

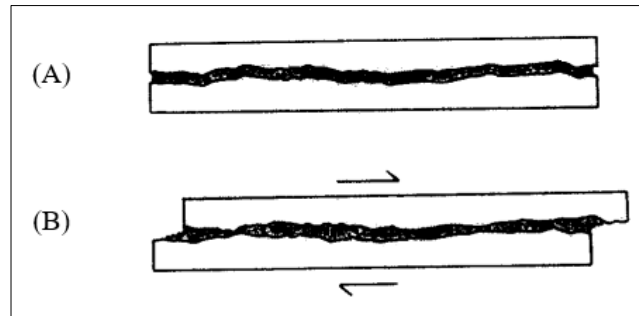
3.4.8 Preenchimento

O preenchimento refere-se a presença de um material que se deposita nas aberturas das discontinuidades, separando as paredes das mesmas. A distância perpendicular em relação às paredes pode ser classificada como largura do material preenchido, sendo mais comuns materiais como calcita, clorita, algumas argilas e lodos que preenchem a abertura formada pela discontinuidade na rocha (ISRM, 1978).

Haja visto uma grande variedade de materiais que podem preencher a abertura de discontinuidades, os mesmos também possuem uma grande variedade de comportamentos físicos, levando a uma mudança drástica na resistência ao cisalhamento e deformabilidade da rocha nessas aberturas preenchidas (ISRM, 1978).

Uma descrição completa desse material é bastante importante em estudos de estabilidade de maciços rochosos, propriedades como: mineralogia, tamanho das partículas, umidade, condutividade hidráulica, largura, rugosidade e fraturamento ou esmagamento da rocha nas paredes são bastante importantes nessas descrições (WYLLIE, 2018). A Figura 12 ilustra a condição de estabilidade e deslocamento na presença de um material preenchendo a abertura da discontinuidade e o Quadro 3 traz a classificação do preenchimento das discontinuidades em função da identificação em campo.

Figura 12 - Preenchimento favorecendo a estabilidade (A) e preenchimento favorecendo o deslocamento (B)



Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

Quadro 4 - Classificação do preenchimento das descontinuidades

Designação	Identificação de campo
Sem preenchimento	Nenhum
Preenchimento favorecendo a estabilidade	Resistente com espessura menor que 5 mm Resistente com espessura maior que 5 mm
Preenchimento favorecendo o deslocamento	Mole com espessura menor que 5 mm Mole com espessura maior que 5 mm

Fonte: Modificado de Maia, 2021.

3.4.9 Infiltração

A infiltração de água no maciço rochoso através das descontinuidades é uma das principais fontes de redução das condições de estabilidade. A água atua reduzindo a resistência ao cisalhamento e aumentando as tensões mobilizadoras, levando, em diversos casos, à perda de estabilidade, conduzindo a ruptura da massa de rocha. A localização da infiltração é bastante importante, pois é possível avaliar informações sobre o fluxo de água no maciço rochoso e caracterizar a condutividade hidráulica do mesmo (ISRM, 1978).

A presença de fluxos de água nas descontinuidades acarretará na remoção de materiais que preenchem as aberturas e a alteração das superfícies reduzindo a sua resistência. Uma boa observação dos fluxos de água pode indicar a posição e variação do nível da água em todo o material rochoso. Em rochas mais competentes e com poucas descontinuidades, a condutividade hidráulica é muito baixa, mas a presença de muitas descontinuidades e com aberturas significantes pode tornar o fluxo bastante elevado (WYLLIE, 2018).

Em regiões de clima seco a taxa de evaporação é mais elevada que a taxa de infiltração, dificultando a observação, já em regiões de clima mais frio essa taxa de evaporação é reduzida e tornando-se possível avaliar a infiltração na rocha (ISRM, 1978). O Quadro 4 traz a designação e classificação a ser adotada em função do grau de infiltração para descontinuidades sem preenchimento e com preenchimento.

Quadro 5 - Designação e classificação das descontinuidades

Classe	Designação	Descontinuidade sem preenchimento	Descontinuidade com preenchimento
I	Seco	Fratura muito plana e fechada. Descontinuidades aparecem secas e sem possibilidade de percolação de água	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível a percolação de água
II	Seco	Fratura seca e sem evidência de percolação de água	Enchimento muito consolidado e seco. Não é possível a percolação de água
III	Moderadamente seco	Fratura seca e com evidências de percolação de água	Enchimento úmido e com presença de gotas ocasionais
IV	Úmido	Fratura úmida, sem percolação de água livre	Enchimento que mostra evidência de lavagem e com fluxo de água contínuo
V	Escorrimentos	Fratura, ocasionalmente gotejando, mas sem fluxo contínuo	Enchimento localmente lavado e com fluxo considerável
VI	Fluxo elevado	Fratura com fluxo contínuo de água	Enchimento completamente lavado e com pressões de água elevadas

Fonte: Maia, 2021.

3.4.10 Famílias de descontinuidades

Família de descontinuidades caracteriza-se pela proximidade em termos de orientações uma em relação às outras. Essa proximidade pode levar a classificação como uma família e empregar o valor médio das propriedades para estudos de estabilidade. A aparência e o comportamento do maciço rochoso são influenciados pelo conjunto de descontinuidades que se cruzam e a extensão das mesmas no maciço (WYLLIE, 2018).

Um número elevado de descontinuidades com valores de orientações próximas, levam a dominância nas condições de instabilidade do maciço rochoso, caso exista um número muito baixo de famílias a probabilidade de instabilidade pode ser bem baixa. Portanto, na avaliação do maciço rochoso todas as famílias devem ser mapeadas para obtenção de bons resultados de avaliação (WYLLIE, 2018). O Quadro 5 demonstra a classificação que pode ser atribuída com base no número de famílias de descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Quadro 6 - Classificação do maciço rochoso

Classificação	Número de famílias
I	Maciço compacto, apresenta descontinuidades aleatórias
II	1 família de descontinuidade
III	1 família de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades aleatórias
IV	2 famílias de descontinuidades
V	2 famílias de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades aleatórias
VI	3 famílias de descontinuidades
VII	3 famílias de descontinuidades, apresentando ainda outras descontinuidades aleatórias
VIII	4 famílias de descontinuidades ou mais
IX	Brecha, maciço fraturado

Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

3.4.11 Tamanho ou forma dos blocos

O tamanho ou forma do bloco é um indicador bastante importante para estudos que preveem o comportamento do maciço rochoso. É obtido em função da persistência e do

espaçamento, delimitados por uma área de mapeamento. Nesse caso, será possível determinar uma forma para os blocos que podem assumir um formato tabular, colunar e quebradiço, este último em dominância no maciço, pode fazer com que a ruptura tenha um comportamento semelhante à de um solo (ISRM, 1978).

Os maciços rochosos formados por blocos de grandes dimensões são menos favoráveis a deformações, além de serem mais coesos, enquanto que blocos muito pequenos são bastante favoráveis a deformações e possuem coesão muito baixa. O tamanho do bloco pode ser obtido pela medida de dimensão média dos vários blocos presentes, ou pelo número total de descontinuidades que se cruzam numa unidade de volume na área mapeada (ISRM, 1978). A Tabela 4 descreve as formas dos blocos com base no número de descontinuidades por metro cúbico de rocha.

Tabela 4 - Classificação do tamanho dos blocos

Classificação	Descontinuidades/m ³
Blocos muito grandes	< 1
Blocos grandes	1 – 3
Blocos médios	3 – 10
Blocos pequenos	10 – 30

Fonte: Modificado de ISRM, 1978.

3.5 Métodos de análise de estabilidade de taludes

Quando se trata de taludes naturais ou artificiais, a estabilidade dos mesmos é um dos principais pontos a serem debatidos. Considera-se talude estável aquele que resiste ao peso próprio da massa de solo ou rocha, forças de percolação, carregamentos externos e a presença de descontinuidades. Já o talude instável é aquele cuja atuação desses fatores instabilizadores é maior ou igual as forças resistivas do talude (GERSCOVICH, 2016).

Para Gerscovich (2016) o objetivo de analisar a estabilidade de um talude refere-se a avaliar a possibilidade da ocorrência de escorregamento de massas de solo ou rocha presente em um talude natural ou artificial. O uso de métodos probabilísticos para avaliar a probabilidade de ruptura em análises cinemáticas e determinísticos para obtenção do fator de segurança são os mais empregados para avaliação da estabilidade de taludes, bem como análises de sensibilidade para cada caso. Uma descrição para ambos está presente logo abaixo.

3.5.1 Método probabilístico

A abordagem probabilística consiste em avaliar de forma sistemática um conjunto de dados amostrais de um lote ou universo e, a partir dessa avaliação, designar uma probabilidade percentual para uma população tendendo ao infinito. Esse método pode ser aplicado em termos de zona crítica de ruptura em análises cinemáticas, definindo a probabilidade de ruptura do talude em termos percentuais (WYLLIE, 2018).

Segundo Wyllie (2018) o emprego desse método deve existir para uma faixa aceitável de probabilidade de falha em obras envolvendo taludes. Fundações, cortes de estrada, barragens, pilhas e taludes de mineração com pouco risco humano, a probabilidade anual aceitável é menor ou igual a 1%, já para altos riscos de perdas humanas essa probabilidade não deve exceder o intervalo de 0,001 a 0,01%.

Dentre as várias abordagens para a obtenção da probabilidade de ruptura, a mais recomendada para taludes é a análise simples de Monte Carlo, onde probabilidade de ruptura (PR) pode ser obtida com base na equação 3.5, na qual (M) é o número de descontinuidades presentes na zona crítica (N) é o número de descontinuidades totais (WYLLIE, 2018).

$$PR = \frac{M}{N} \quad (3.5)$$

3.5.2 Método determinístico

Diversos estudos sobre estabilidade de taludes empregam a abordagem determinística, que levam ao cálculo de um valor denominado fator de segurança (FS). O fator de segurança pode ser definido como a relação entre a tensão de cisalhamento resistiva e tensão de cisalhamento mobilizadora, com base na equação 3.6. Essa análise visa avaliar o comportamento das tensões de cisalhamento, denominadas mobilizadoras (τ_m) que tendem a favorecer o escorregamento, em relação às tensões de cisalhamento resistivas (τ_s) que se opõem ao movimento. Em avaliação de taludes ou realização de projetos, um valor de fator de segurança é assumido em função dos riscos que a ruptura do talude pode ocasionar em termos de perdas econômicas ou humanas (GERSCOVICH, 2016).

$$FS = \frac{\tau_s}{\tau_m} \quad (3.6)$$

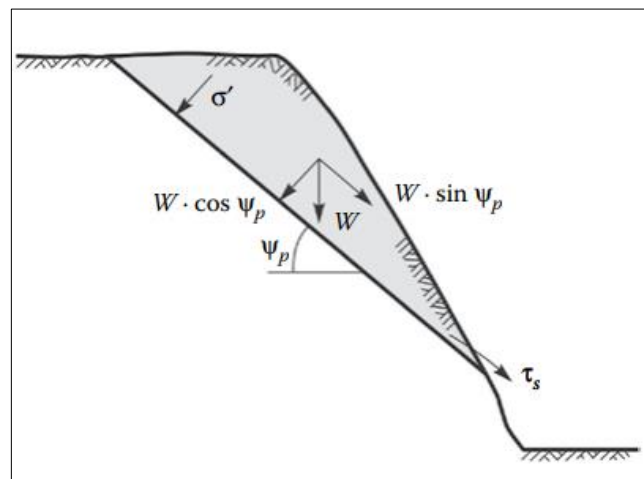
Para a Figura 13 que ilustra uma situação de ruptura planar, a estabilidade do talude vai depender da resistência ao cisalhamento gerada ao longo da descontinuidade que favorece ao movimento de massa. Em uma análise simples de ruptura planar por cisalhamento sem a presença de rugosidade na superfície da descontinuidade, com um grau de saturação de zero no talude e com as propriedades da rocha se assemelhando a de um solo, a resistência pode ser obtida com base no critério de ruptura de Mohr-Coulomb (1773), onde a resistência ao cisalhamento (τ) pode ser expressa em termos de coesão (c), tensão normal atuante na rocha (σ') e ângulo de atrito interno (ϕ), segundo a equação 3.7. As equações 3.8 e 3.9 demonstram a tensão normal e de cisalhamento respectivamente em relação a orientação da descontinuidade para o talude da Figura 13 (WYLLIE, 2018).

$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan \phi \quad (3.7)$$

$$\sigma' = \frac{W \cdot \cos \psi_p}{A} \quad (3.8)$$

$$\tau_s = \frac{W \cdot \sin \psi_p}{A} \quad (3.9)$$

Figura 13 - Geometria de uma ruptura planar



Fonte: Wyllie, 2018.

Substituindo a equação de tensão normal na equação 3.7, obtém-se a tensão de cisalhamento resistiva. Já a tensão de cisalhamento mobilizadora é a tensão de cisalhamento atuante no plano da descontinuidade. Substituindo essas tensões na equação 3.6 é possível obter o fator de segurança para taludes sem ação de forças de percolação, segundo a equação 3.10.

$$FS = \frac{c \cdot A + W \cdot \cos \psi_p \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \psi_p} \quad (3.10)$$

Onde (A) é a área da descontinuidade em m^2/m calculada segundo a equação 3.11, que leva em conta a inclinação da descontinuidade (ψ_p) e a altura da descontinuidade (h) que é a distância entre o plano horizontal do topo do talude e o plano horizontal da base da descontinuidade na face do talude. Já (W) é a força peso em MN/m que age sobre a área da descontinuidade, calculado segundo a equação 3.12. Tendo como novos parâmetros (b) que é distância horizontal entre a crista do talude e a projeção da extremidade superior da descontinuidade no topo do talude, segundo a equação 3.13, (γ) o peso específico do solo ou rocha e (ψ_f) e (ψ_s) a inclinação da face e o do topo do talude respectivamente (WYLLIE, 2018).

$$A = \frac{h}{\sin \psi_p} \quad (3.11)$$

$$W = \gamma \left[(1 - \cot \psi_f \cdot \tan \psi_p) \cdot \left(b \cdot h + \frac{1}{2} h^2 \cdot \cot \psi_f \right) + \frac{1}{2} b^2 (\tan \psi_s - \tan \psi_p) \right] \quad (3.12)$$

$$b = \frac{h}{\tan \psi_p} - \frac{h}{\tan \psi_f} \quad (3.13)$$

Mesmo em um critério de ruptura mais simplificado para o cálculo do fator de segurança, diversas equações são necessárias para que possa ser encontrado o fator, ao utilizar outro critério que mais se aproxima da aplicação real, os procedimentos matemáticos manuais para o cálculo se tornam bastante complexos, somando-se a dificuldade já existente na aquisição dos parâmetros do talude. Na presença de forças de percolação, a água atua ao longo do talude com o nível do lençol freático mergulhando ao horizonte do mesmo, direcionando uma pressão hidrostática com componente normal e cisalhante, além de atuar como poro pressão diminuindo a tensão normal atuante na superfície de ruptura, complicando ainda mais os procedimentos de cálculos manuais (WYLLIE, 2018).

Com os avanços das tecnologias de processamento de dados computacionais, todas as equações possíveis para o cálculo do fator de segurança foram programadas em softwares de geotecnia, bem como os critérios de rupturas mais aceitos pela comunidade de mecânica das rochas e dos solos. Com essas ferramentas computacionais, basta apenas selecionar o modelo matemático de ruptura e inserir as constantes do critério e os parâmetros geométricos, físicos e

mecânicos do talude, direcionando ao cálculo do fator de segurança em poucos segundos (WYLLIE, 2018).

3.5.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade envolve a avaliação da probabilidade de ruptura ou fator de segurança em função da variação de um parâmetro geométrico, físico e mecânico do talude, para que seja possível avaliar quais vão ter mais influência na estabilidade do mesmo. Devido a heterogeneidade do material, parâmetros como densidade, coesão, ângulo de atrito interno e resistência à compressão uniaxial vão possuir um limite inferior e superior em relação ao valor calculado por determinado método. Já para a geometria do talude, a inclinação da face, do topo, a altura e direção vão influenciar na condição de estabilidade ou instabilidade da descontinuidade, devido a direção de mergulho e inclinação da mesma serem inalteradas. Logo, empregar um método que possa avaliar o efeito da variabilidade desses parâmetros na rocha ou solo, sobre o fator de segurança ou probabilidade de falha, é a maneira mais adequada para dimensionar a condição ideal desses parâmetros sobre a estabilidade (WYLLIE, 2018).

Avaliar mais de dois parâmetros é bastante complexo, e na prática o recomendado é analisar a influência de cada parâmetro separadamente em função da estabilidade e, adotar as melhores condições encontradas ao avaliar todas as possíveis influências no equilíbrio do talude. Adota-se nesse tipo de avaliação um limite superior e inferior do parâmetro a ser avaliado e traça-se um gráfico do fator de segurança ou probabilidade de ruptura em função da faixa do parâmetro avaliado (WYLLIE, 2018).

Em alguns casos um parâmetro terá mais influência sobre os outros, mas é comum que mais de um tenha grande influência na variação da condição de estabilidade, tornando-se difícil selecionar o fator ótimo, pois a condição de equilíbrio de um pode ser a condição de instabilidade do outro. Em obras envolvendo talude o mais fácil de alterar é a inclinação do mesmo, sendo que, vários estudos demonstram que a inclinação influencia bastante na estabilidade, pois alterar a direção e altura é impraticável em diversas obras. Portanto, a análise de sensibilidade surge como acréscimo na avaliação por métodos determinísticos e probabilísticos, para avaliar a influência da variação de estabilidade de taludes em função da variação de parâmetros, para que, seja possível alcançar a condição mais ideal de estabilidade (WYLLIE, 2018).

3.6 Estimativa da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta com uso do martelo de Schmidt

O martelo de Schmidt ou esclerômetro é um equipamento bastante utilizado para estimativas da resistência do concreto em obras civis. Por se tratar de um método indireto e não destrutivo do material a ser analisado, diversos autores procuraram uma forma de correlacionar o número do rebote (H_r) do martelo em função da resistência à compressão uniaxial da rocha (σ_{ci}). O princípio de funcionamento desse equipamento é simples, bastando aplicá-lo ortogonalmente na superfície com o êmbolo retraído, após essa aplicação o êmbolo dispara e um valor de rebote é lido no equipamento, este valor mede a energia remanescente devido a absorção pelo impacto e transformação em som. Essa energia remanescente é a resistência à penetração do material (SANTOS, 2015).

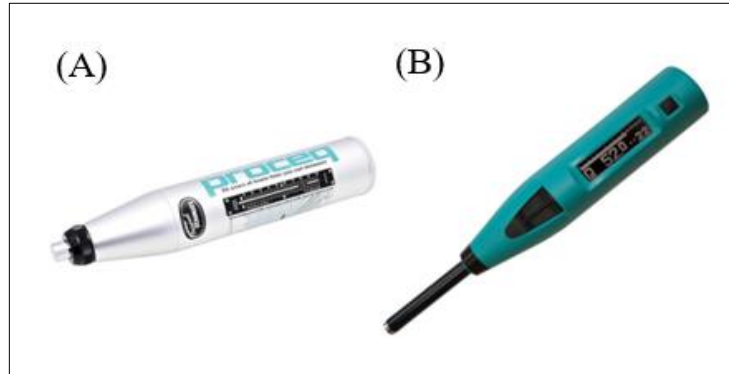
Aydin & Basu (2005) consideram que o tipo de martelo, direção do impacto, características da amostra, intemperismo e umidade influenciam no valor obtido do ensaio, necessitando de um elevado cuidado ao realizar as medições, para reduzir o erro devidos a esses parâmetros que influenciam no valor do rebote. Existem dois tipos de martelo, o do tipo L e tipo N, sendo o primeiro mais adequado para ensaios em materiais menos resistentes devido sua energia ser de 0,735 N, já o segundo é utilizado para materiais mais resistentes em ensaios realizados em campo com uma energia de impacto de 2.207 N (MARQUES; EDUARDO, 2022).

A equação 3.14 proposta por Aydin & Basu (2005) traz a correlação entre o número de rebotes para martelo tipo N (H_{rN}) e martelos tipo L (H_{rL}). Essa equação é bastante utilizada para correlacionar com a metodologia de estimativa de determinado autor, quando não se dispõe de um dos dois tipos de martelos. Os primeiros esclerômetros utilizados eram mecânicos. Hoje em dia já se dispõe de esclerômetros digitais, o primeiro possui cartas de correlação (Anexo A e B) para corrigir o valor do rebote em relação a inclinação do equipamento para realização do ensaio. Já o segundo não precisa de correlação devido à inclinação, mas o valor do rebote deve ser corrigido para se adequar às equações de estimativa da resistência à compressão. A equação 3.15 proposta por Winkler & Matthews (2014) permite a correção do valor de rebote medido no martelo digital (H_D) para rebote convencional (H_r) (MARQUES; EDUARDO, 2022). A Figura 14 (A) e (B) ilustram respectivamente o martelo de Schmidt mecânico e digital.

$$H_{rN} = 1,0646 \cdot H_{rL} + 6,3673 \quad (3.14)$$

$$H_D = \frac{H_r - 8.5605}{1.0008} \quad (3.15)$$

Figura 14 - Martelo de Schmidt mecânico (A) e Martelo de Schmidt digital (B)



Fonte: Hira laboratory testing equipment, 2022.

Dentre as diversas equações publicadas de correlação, a que mais se destaca é a equação de Deere & Miller (1966), obtida em função de valores reais de resistência à compressão uniaxial de 28 litologias de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, alcançando um coeficiente de correlação de 0.94 e intervalo de obtenção da resistência à compressão uniaxial de 22 a 358 MPa. A equação 3.16 é empregada para o cálculo da resistência à compressão uniaxial (σ_{ci}) em função do número do rebote para martelo tipo L (H_{rL}) e peso específico da rocha (γ).

$$\sigma_{ci} = 9.97 \cdot e^{(0.02 \cdot H_{rL} \cdot \gamma)} \quad (3.16)$$

O peso específico da rocha pode ser obtido por picnometria com base na norma DNER-ME 093/94. A equação 3.17 é empregada para determinação da densidade (D) por picnometria, onde (P_1) é o peso do picnômetro vazio, (P_2) o peso do picnômetro mais amostra, (P_3) o peso do picnômetro mais amostra e água e (P_4) o peso do picnômetro mais água. Sendo o peso específico da rocha o produto da densidade pela aceleração da gravidade com valor de aproximadamente 10 m/s².

$$D = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (3.17)$$

3.7 Critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado

O critério de ruptura de Hoek-Brown é o mais recomendado para estudos de estabilidade de taludes em maciços rochosos. Foi desenvolvido inicialmente para aplicação em rupturas de rochas com dureza elevada, considerando em um primeiro momento as propriedades da rocha intacta, e reduzindo esse valor obtido posteriormente com a utilização de fatores para melhor representar o comportamento no maciço rochoso. Surgiu de estudos de ruptura frágil em rochas intactas idealizados por Hoek e de estudos de comportamento sobre tensões atuantes em maciços rochosos realizados por Brown (HOEK *et al.*, 2002).

Pela falta de alternativas adequadas ao longo dos últimos anos, o critério se tornou o mais recomendado pelas comunidades internacionais de mecânica das rochas. Por ser o mais recomendado, sua aplicação se espalhou além das fronteiras dos estudos dos autores. Logo era necessária sua atualização de tempos em tempos, para melhor se adequar às diversas aplicações que lhe foi direcionado (HOEK; BROWN, 2018).

A última grande atualização foi proposta por Hoek *et al.* (2002). Essa atualização introduziu o fator de distúrbio para massa de rochas perturbadas e não perturbadas, um nova constante reduzida da constante do material, a substituição do critério empírico para avaliação geológica que antes era feito com base no RMR de Bieniawski para o GSI de Hoek e a correlação de valores para a obtenção da coesão e ângulo de atrito interno.

A nova expressão do critério foi intitulada de critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, com base na equação 3.18, sendo que, a ruptura se dará quando as tensões atuantes forem maiores ou iguais à resistência da rocha.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3.18)$$

Onde (σ'_1) e (σ'_3) são o maior e menor esforço atuante na rocha, (σ_{ci}) a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, (m_b) é uma nova constante derivada da constante do material (m_i) , cujo valor depende do tipo de rocha segundo o anexo B, (s) e (a) são constantes. As constantes do critério dependem do índice de resistência geológica (GSI) e do fator de distúrbio (D) com exceção da constante (a) para esse último fator. As constantes m_b , s e a são dadas pelas equações 3.19, 3.20 e 3.21 respectivamente.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad (3.19)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3.20)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (3.21)$$

A partir do critério de Hoek-Brown Generalizado é possível calcular a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso (τ') segundo a equação 3.22, bastando apenas substituir o menor esforço máximo (σ'_{3max}) que o maciço suporta na equação do critério para encontrar o maior esforço máximo (σ'_{1max}). O (σ'_{3max}) pode ser calculado em função da resistência do maciço rochoso (σ'_{cm}), peso específico da rocha (γ) e altura do talude rochoso (H) segundo a equação 3.23. A resistência do maciço rochoso (σ'_{cm}) pode ser encontrada pela equação 3.24 que envolve as constantes do critério de Hoek-Brown Generalizado ponderando a resistência à compressão uniaxial (σ_{ci}). Já a relação entre ($d\sigma'_1/d\sigma'_3$) é calculado segundo a equação 3.25 (HOEK *et al.*, 2002).

$$\tau' = (\sigma'_{1max} - \sigma'_{3max}) \frac{\sqrt{d\sigma'_1/d\sigma'_3}}{d\sigma'_1/d\sigma'_3 + 1} \quad (3.22)$$

$$\sigma'_{3max} = \sigma'_{cm} \cdot 0.72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.91} \quad (3.23)$$

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \quad (3.24)$$

$$d\sigma'_1/d\sigma'_3 = 1 + am_b(m_b\sigma'_{3max}/\sigma_{ci} + s)^{a-1} \quad (3.25)$$

Alguns softwares de geotecnia ainda empregam o critério de Mohr-Coulomb, anteriormente comentado para avaliação de rochas em estudos de ruptura por cisalhamento. Logo, uma obtenção da coesão e do ângulo de atrito interno com base no critério de Hoek-Brown Generalizado para ser usado no critério Mohr-Coulomb é o mais recomendado (HOEK *et al.*, 2002). A equação 3.26 é utilizada para obtenção do ângulo de atrito interno e a equação 3.27 para obtenção da coesão.

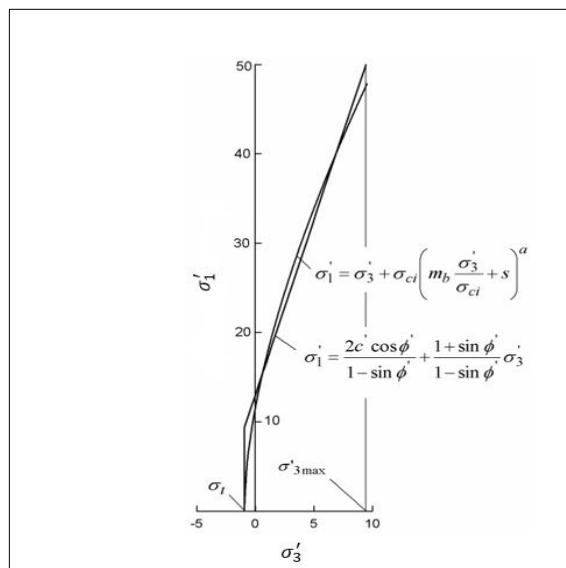
$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (3.26)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}/((1+a)(2+a))}} \quad (3.27)$$

Essas equações são derivadas de ajustes em gráficos de tensão maior versus tensão menor em função dos dois critérios, com base na Figura 15. As constantes são as mesmas utilizadas no critério de Hoek-Brown Generalizado. Tendo como adição diferente o (σ'_{3n}) que é igual a relação entre o menor esforço máximo (σ'_{3max}) e a resistência à compressão uniaxial (σ_{ci}) com base na equação 3.28 (HOEK *et al.*, 2002).

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (3.28)$$

Figura 15 - Relação entre σ'_1 e σ'_3 com base no critério de Hoek-Brown Generalizado e Mohr-Coulomb



Fonte: Modificado de Hoek *et al.*, 2018.

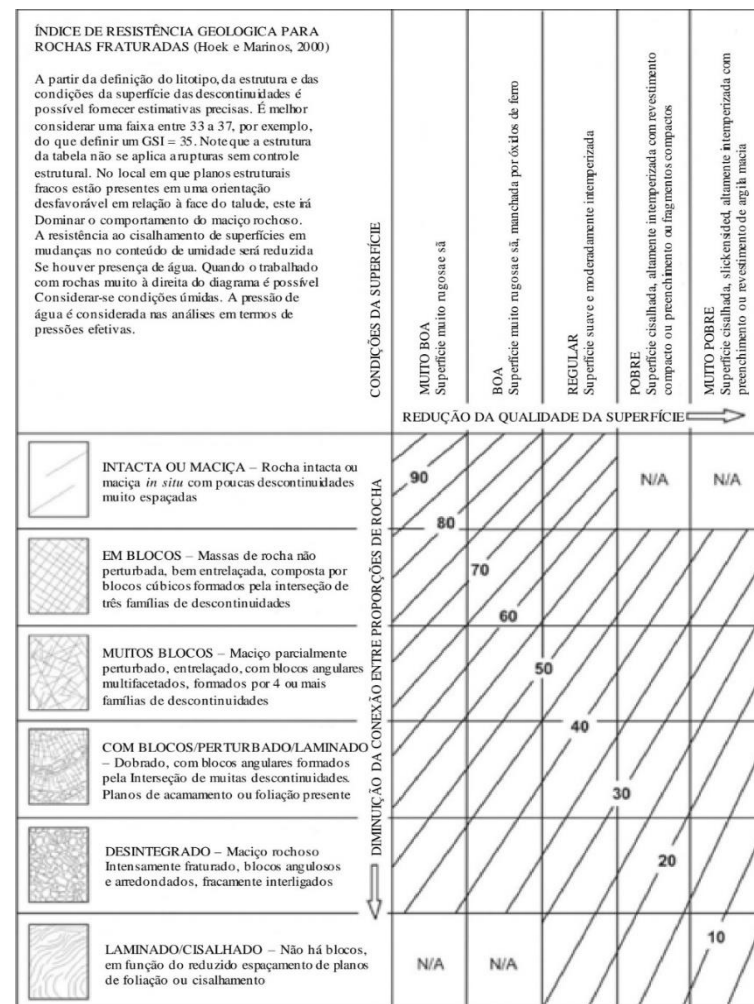
3.7.1 Índice de resistência geológica (GSI)

O GSI foi introduzido por Hoek *et al.* em 1995 como uma ferramenta para coleta de informações de campo e, utilizando-se de um valor quantitativo obtido com base na descrição geológica do maciço, o mesmo poderia ser incorporado no critério de Hoek-Brown para substituir a classificação RMR de Bieniawski. A classificação GSI foi definida para

abordar dois fatores considerados mais importantes na influência de propriedades mecânicas de um maciço rochoso, a estrutura e as condições de alteração da superfície do maciço (HOEK; BROWN, 2018).

Esse sistema de classificação foi desenvolvido para lidar com maciços rochosos compostos por blocos interligados, na qual o processo de ruptura ocorre por deslizamento ou rotação do bloco sobre uma superfície, tendo substituído o RMR como critério empírico para observações geológicas em 2002 (HOEK; BROWN, 2018). A Figura 16 ilustra a carta de classificação GSI para uma variedade de formações rochosas.

Figura 16 - Carta de classificação GSI



Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 2013.



3.7.2 Fator de distúrbio (D)

Quando massas de rocha são escavadas, a remoção da rocha resulta em um alívio de tensão que permite o relaxamento e dilatação de massas rochosas circundantes, sendo que,

o objetivo de todo projeto de taludes e túneis é controlar essa dilatação e os deslocamentos induzidos, a fim de minimizar a ruptura da rocha. O fator de distúrbio foi criado visando ser inserido no critério de Hoek-Brown, para representar um valor quantitativo dos distúrbios ocasionados em rochas devido ao método de escavação adotado (HOEK *et al.*, 2002).

Escavações mecanizadas ou com uso de explosivos geram distúrbios no maciço remanescente, sendo a seleção do método um fator chave para controle dessas perturbações. O fator assume um valor de 1 para maciços perturbados e 0 para maciços não perturbados, variando dentro desse intervalo de acordo com o método de escavação utilizado e as condições do maciço remanescente. O estudo de diversos autores sobre perturbações em massas rochosas levou a criação de diretrizes para estimar esse fator entre 0 e 1 e estão dispostas no Quadro 6. Recomenda-se que o fator seja direcionado para seções e não para todo o maciço rochoso avaliado (HOEK *et al.*, 2002).

Quadro 7 - Sugestões para o fator de distúrbio D

Aparência do maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Sugestão do valor de D
	<p>A detonação de pequena escala em taludes de engenharia civil resulta em danos modestos no maciço rochoso, particularmente se a detonação controlada for usada como mostrado no lado esquerdo da fotografia. No entanto, o alívio de tensão resulta em alguma perturbação.</p>	<p>D = 0.7 Boa detonação</p> <p>D = 1.0 Péssima detonação</p>
	<p>Taludes muito grandes de minas a céu aberto sofrem perturbações significativas devido a detonação de produção e o alívio de tensão da remoção de estéril.</p> <p>Em rochas mais macias, a escavação pode ser realizada de forma mecanizada com o grau de dano ao maciço rochoso sendo menor.</p>	<p>D = 1.0 Detonação de produção</p> <p>D = 0.7 Escavação mecanizada</p>

Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 2002.

3.8 Tipos de rupturas

Existem basicamente quatro tipos de rupturas para rochas, a ruptura planar, em cunha, circular e por tombamento. Cada um desses tipos de rupturas possui características diferentes, logo, uma boa interpretação de cada uma separadamente faz-se necessário, pois em cada ruptura, pode apresentar mais de uma análise a ser efetuada para a obtenção de parâmetros quantitativos ou qualitativos sobre a estabilidade (WYLLIE, 2018).

Em estudos sobre estabilidade de taludes de rocha é sempre recomendado a realização da análise cinemática-probabilística, pois a partir dela é possível avaliar a tendência para um dos quatro tipos de rupturas em função da orientação estrutural das descontinuidades presentes na rocha. Mas esse tipo de análise não considera fatores importantes tais como a presença de água e geometria do talude que influenciam bastante nas condições de instabilidade, empregando apenas a orientação das descontinuidades e o ângulo de atrito interno aproximado do maciço rochoso na avaliação da estabilidade (WYLLIE, 2018).

Mesmo assim, a análise cinemática-probabilística é muito empregada, sendo que a partir dela direciona-se para outros métodos, tais como análises determinísticas. Nas análises determinísticas é empregado uma gama de fatores físicos e geométricos em função dos quatro tipos de rupturas, direcionando o fator de segurança mais crítico para a ruptura provável (WYLLIE, 2018). Uma descrição mais ampla sobre os quatro tipos de rupturas encontra-se logo abaixo.

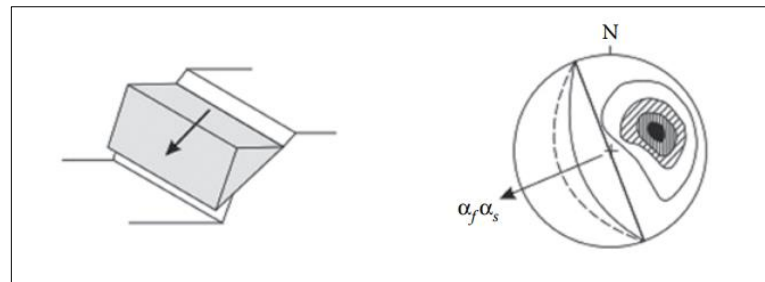
3.8.1 Ruptura planar

A ruptura planar em taludes rochosos ocorre quando um plano de descontinuidade ou mais de uma sofre deslizamento sobre uma superfície planar, ocasionado pela redução da resistência ao cisalhamento, que leva ao escorregamento de uma massa de solo ou rocha paralelo ao mergulho do talude. A Figura 17 ilustra a geometria da ruptura planar e o sentido do plano de deslizamento em relação a direção do talude. Segundo Wyllie (2018) a ruptura planar só ocorre quando as seguintes condições geométricas e físicas são atendidas:

- 1 O plano potencial de ruptura que fornecerá condições para o deslizamento da massa de solo ou rocha deve ser paralelo ou quase paralelo à face do talude, tendo como limite adotado a faixa de $\pm 20^\circ$ em relação a sua direção;

- 2 O plano de deslizamento mergulhando quase na mesma direção do talude deve possuir uma inclinação menor que a inclinação da face do talude;
- 3 A inclinação do plano de ruptura deve ser maior ou igual ao ângulo de atrito interno do maciço rochoso para superfícies de deslizamento lisas, ou maior ou igual ao ângulo de atrito residual para superfícies de deslizamento rugosas;
- 4 A extremidade superior da superfície potencial de ruptura deve cruzar a porção superior do talude ou terminar em uma fenda de tração;
- 5 A superfície de ruptura deve fornecer resistência desprezível ao deslizamento, ao longo dos limites de deslizamento.

Figura 17 - Ruptura planar e sentido do plano de deslizamento em relação a direção do talude

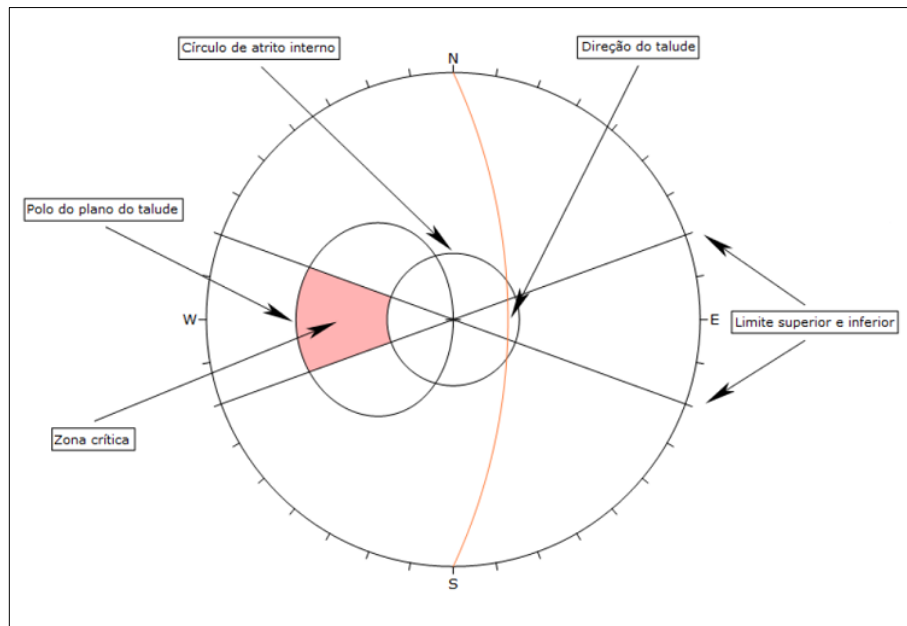


Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

A análise cinemática para obtenção da probabilidade de ruptura planar é feita através de projeção estereográfica, onde as orientações das discontinuidades e o plano da face do talude são plotadas em um estereograma e seu vetor normal também chamado de polo é plotado a 90° do plano. É definido o limite superior e inferior em relação à direção da face do talude adotando-se $\pm 20^\circ$ na maioria das análises. Posteriormente é feita a plotagem do ângulo de atrito na forma de um círculo do interior do estereograma até sua angulação. Por fim, é definida a zona crítica, situada fora do círculo de atrito e abaixo do polo da face do talude, limitada pelos limites inferior e superior (GOODMAN, 1989).

A Figura 18 traz a localização de cada uma dessas variáveis necessárias para a análise de estabilidade planar. A instabilidade do plano se dará quando o polo da discontinuidade estiver contido na zona crítica, que representa a situação de inclinação maior que o ângulo de atrito interno e menor que a inclinação do talude, sendo que a probabilidade de ruptura do talude ou seção será obtida pela razão entre o número de pólos contidos na zona crítica por todos os polos presentes no estereograma (GOODMAN, 1989).

Figura 18 - Representação das variáveis para análise cinemática de ruptura planar no estereograma

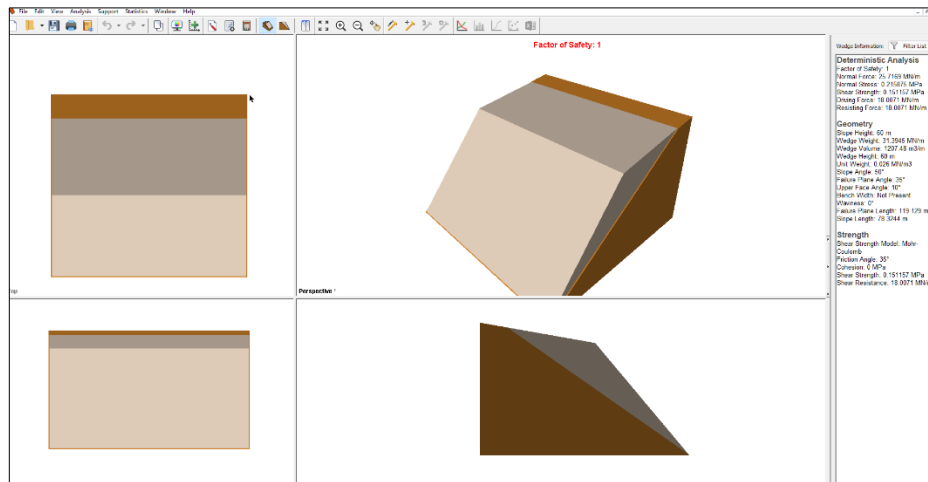


Fonte: Elaborado pelo autor.

A interpretação da análise determinística desse tipo de ruptura se dá em relação às tensões resistivas e instabilizadoras, em função de parâmetros geomecânicos obtidos pelo critério de Hoek-Brown Generalizado. A utilização de informações sobre a geometria do talude e parâmetros geomecânicos torna essa análise mais precisa em relação a abordagem probabilística por projeção estereográfica (WYLLIE, 2018).

Para essa análise os parâmetros geométricos tais como: inclinação e altura da descontinuidade e do talude, inclinação e comprimento do topo do talude, inclinação, profundidade, ângulo e distância em relação a crista da trinca de tração, devem ser obtidos para o cálculo. Já os parâmetros geomecânicos tais como: peso específico da rocha e parâmetros do critério de ruptura adotado devem também ser obtidos para o cálculo. O nível da água e sua variação ao longo da geometria do talude e porcentagem de saturação podem ser empregados para o cálculo do fator de segurança. Essa análise é feita em softwares para situações mais complexas, sendo o cálculo manual feito individualmente para cada superfície potencial de ruptura (ROCSCIENCE, 2022). A Figura 19 ilustra a tela de visualização do resultado de uma análise do fator de segurança para a condição de ruptura planar no Software RocPlane da Rocscience.

Figura 19 - Análise de ruptura planar no Software RocPlane da Rocscience

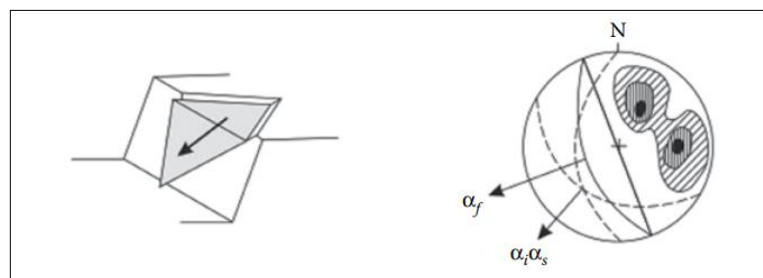


Fonte: Rocscience, 2022.

3.8.2 Ruptura em cunha

A ruptura em cunha ocorre quando duas descontinuidades se interceptam e formam uma cunha com direção preferencial a do talude. O deslizamento da cunha ocorrerá sobre a superfície formada entre o cruzamento das duas descontinuidades, podendo ter um volume de rocha movimentada maior ou menor em relação a ruptura planar. O deslizamento ocorrerá quando as tensões de cisalhamento resistivas perderem sua atuação sobre a superfície potencial de ruptura, podendo esta ocorrer em uma faixa maior de condições geológicas e geométricas em relação aos outros tipos de rupturas (GOODMAN, 1989). A Figura 20 ilustra o formato geométrico de uma cunha formada em um talude, bem como a direção do deslizamento da cunha em relação a direção do talude.

Figura 20 - Ruptura em cunha e direção do deslizamento da cunha em relação a direção do talude

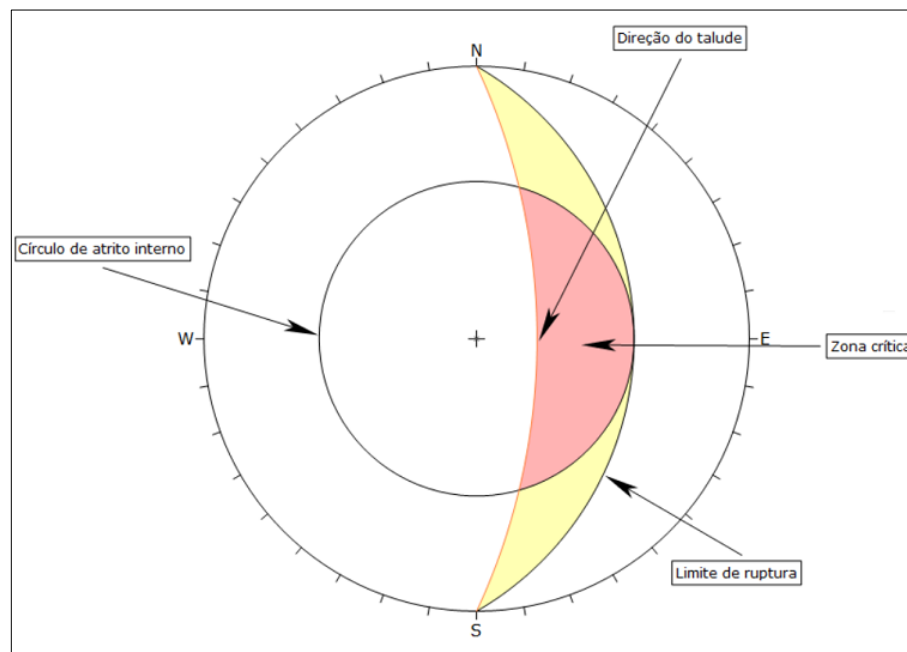


Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

A análise da ruptura em cunha é a que mais emprega a projeção estereográfica para sua avaliação. Da mesma forma que a ruptura planar, a análise cinemática para obtenção da probabilidade de ruptura se dá através da projeção dos planos das discontinuidades e da orientação do talude, bem como a plotagem dos seus respectivos pólos. O ângulo de atrito é plotado como círculo de atrito interno, mas diferente da ruptura planar é plotado de fora para dentro do estereograma. Já a zona crítica é definida entre o plano da direção do talude e o círculo de atrito, sendo que a zona crítica será dividida em primária limitada pelo círculo de atrito e secundária ultrapassando esse círculo mais ainda presente no limite de análise (GOODMAN, 1989).

A Figura 21 demonstra as variáveis empregadas para a avaliação cinemática para ruptura em cunha. A instabilidade da cunha se dará quando a interseção entre dois planos de discontinuidades estiver contida na zona crítica, que sinaliza uma interseção com mergulho maior que o ângulo de atrito interno e menor que a inclinação do talude. A probabilidade de ruptura do talude ou seção pode ser obtida pela relação entre o número de interseções presentes na zona crítica pelo número de interseções presentes no estereograma (GOODMAN, 1989).

Figura 21 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura em cunha no estereograma



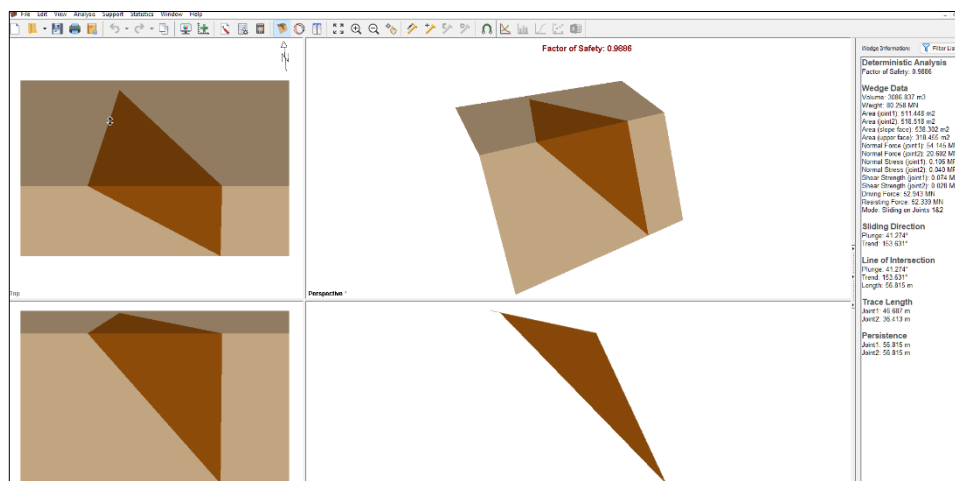
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise determinística para ruptura em cunha é feita com base nos ângulos formados entre as interseções entre duas discontinuidades que se cruzam, formando um volume

de cunha que pode ser avaliado em função das tensões resistivas e mobilizadoras (WYLLIE, 2018).

Para essa análise os parâmetros geométricos tais como: inclinação, direção da inclinação, altura e largura do talude, inclinação e comprimento do topo do talude, inclinação, profundidade e distância em relação a crista da trinca de tração, devem ser obtidos para o cálculo, além da inclinação e direção da inclinação das descontinuidades que se cruzam. Já os parâmetros geomecânicos tais como: peso específico da rocha, coesão, ângulo de atrito interno e parâmetros do critério de ruptura adotado devem também ser obtidos para o cálculo. O nível da água e sua variação ao longo da geometria do talude e porcentagem de saturação podem ser empregados para o cálculo do fator de segurança (ROCSCIENCE, 2022). A Figura 22 ilustra a tela de visualização do resultado de uma análise do fator de segurança para a condição de ruptura em cunha no Software SWedge da Rocscience.

Figura 22 - Análise de ruptura em cunha no Software SWedge da Rocscience



Fonte: Rocscience, 2022.

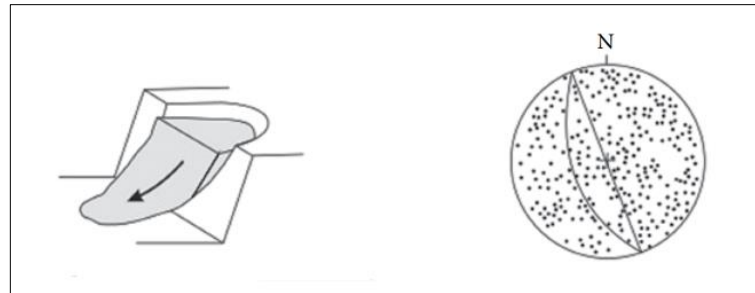
3.8.3 Ruptura circular

A ruptura circular ocorre em rochas muito fracas, altamente intemperizadas e com um grau de fraturamento bastante elevado. Nesse caso, a ruptura forma uma superfície circular em relação ao talude, tendo essa superfície origem no topo do talude ou logo abaixo de uma fenda de tração, se estendendo até a face ou pé do talude (WYLLIE, 2018).

Diferente dos outros tipos de ruptura, onde as estruturas geológicas têm um papel fundamental para a condição de estabilidade, na ruptura circular essas estruturas estão muito dispersas e com um grau de fraturamento bastante elevado, fazendo com que os materiais

presentes busquem a menor linha de resistência para gerar o movimento de massa sobre a forma de um plano circular. A Figura 23 ilustra a geometria circular para esse tipo de ruptura, a direção característica para o deslizamento e o padrão bastante disperso das estruturas em uma projeção estereográfica (WYLLIE, 2018).

Figura 23 - Ruptura circular, direção de deslizamento e padrão disperso das descontinuidades



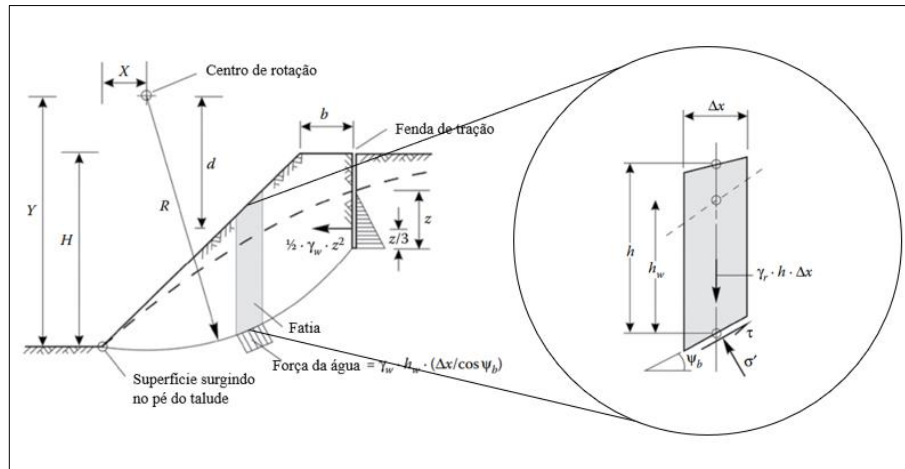
Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

A análise cinemática por projeção estereográfica não se aplica para esse tipo de ruptura, pois é característica de maciços rochosos com dispersão bastante elevada das descontinuidades, condicionando apenas o julgamento das estruturas geológicas a partir da projeção estereográfica, caso possuam ou não um padrão elevado de dispersão (WYLLIE, 2018).

O método determinístico por equilíbrio e limite é o recomendado para ser utilizado em análises desse tipo de ruptura, principalmente para projetos de aterro e pilhas com material rochoso altamente fragmentado, assumindo condições próximas à de solos, onde as partículas individuais tendem a ser pequenas em relação ao tamanho do talude e levam à formação de uma superfície circular que condicionará ou não ao deslizamento (WYLLIE, 2018).

Existem na literatura várias metodologias para a obtenção do fator de segurança para esse tipo de ruptura, sendo o mais recomendado para análises em rochas o método de Bishop Simplificado, pois obedece ao critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado. Esse método divide a seção do talude em fatias com comprimento e altura variáveis, levando em consideração a contribuição individual da coesão, ângulo de atrito interno, tensão normal, presença e altura do nível de água para cada fatia em função de um centro de rotação, e posteriormente as une para obtenção da superfície que condicionará ao menor fator de segurança (WYLLIE, 2018). A Figura 24 demonstra as variáveis geométricas na seção do talude adotadas nesse método e individualiza uma fatia da seção com as variáveis geométricas e de equilíbrio adotadas.

Figura 24 - Seção do talude, individualização de uma fatia e variáveis geométricas para análise via método de Bishop Simplificado

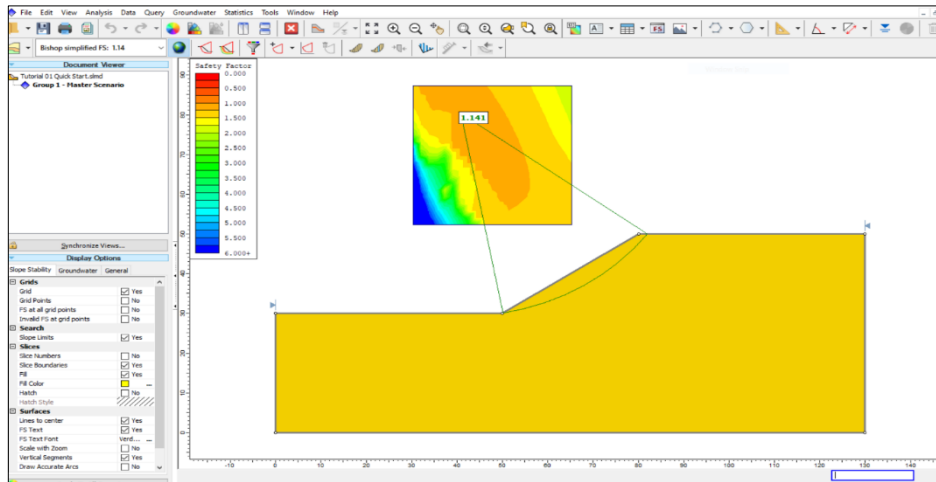


Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

Para essa análise por equilíbrio e limite a geometria do talude e o critério de ruptura serão os parâmetros chave para avaliação do fator de segurança. Logo a geometria do talude e da fundação devem ser inseridas em formato de seção 2D de corte no talude, posteriormente deve ser feita a seleção da análise para circular, número de intervalos em X e Y para a grande que limita o centro de rotação e delimitação do limite de varredura da superfície crítica na seção 2D do talude. Já os parâmetros geomecânicos tais como: peso específico da rocha e parâmetros do critério de ruptura adotado devem também serem obtidos para o cálculo e inseridos para cada litologia presente no talude (ROCSCIENCE, 2022).

Dependendo da quantidade de fatias e da dificuldade em encontrar a superfície potencial de ruptura, o método de Bishop Simplificado torna-se bastante complexo e demorado, sendo a utilização de programas computacionais que realizam análises de equilíbrio e limite a melhor solução possível para obtenção do fator de segurança com base nesse método (ROCSCIENCE, 2022). A Figura 25 ilustra a tela de visualização do resultado de uma análise do fator de segurança para a condição de ruptura circular no Software Slide2 da Rocscience.

Figura 25 - Análise de ruptura circular no Software Slide2 da Rocscience

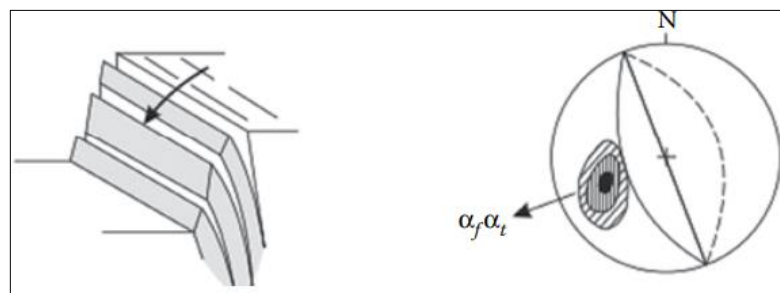


Fonte: Rocscience, 2022.

3.8.4 Ruptura por tombamento

Diferentemente dos outros tipos de ruptura que ocorrem em função da formação de uma superfície que favorece o deslocamento, a ruptura por tombamento envolve a rotação de um ou diversos blocos sobre uma base fixa. A altura dos blocos é um dos parâmetros que mais influência na condição de tombamento, caso estes blocos sejam formados por descontinuidades que mergulham no sentido contrário a face do talude. Na maioria das descontinuidades que formam blocos paralelos entre si, a abertura é mais larga no topo e vai diminuindo em relação à base de sustentação. Essas aberturas favorecem o processo de erosão pela ação da água, que degrada as condições de estabilidade. (WYLLIE, 2018). A Figura 26 ilustra a forma geométrica dos blocos com inclinação contrária à da face do talude.

Figura 26 - Ruptura por tombamento e forma geométrica dos blocos com inclinação contrária à do talude



Fonte: Modificado de Wyllie, 2018.

Duas considerações são empregadas para avaliar a condição de estabilidade ou instabilidade do bloco. A primeira leva em conta que o bloco será estável se a inclinação da base (ψ_p) que suporta o bloco for menor que o ângulo de atrito interno da rocha (ϕ). Já a segunda leva em conta o centro de gravidade do bloco, na qual a estabilidade é alcançada quando a relação entre a largura (Δ_x) e altura do bloco (y) for maior que a tangente da inclinação da base que suporta o bloco (WYLLIE, 2018). As equações 3.29 e 3.30 são utilizadas para validar essas duas considerações.

$$\psi_p < \phi - \text{Estável} \quad (3.29)$$

$$\frac{\Delta_x}{y} > \tan \psi_p - \text{Estável} \quad (3.30)$$

Segundo Wyllie (2018) a ruptura por tombamento é subdividida em dois tipos distintos, o tombamento do bloco e o tombamento por flexão. Definindo-os da seguinte forma:

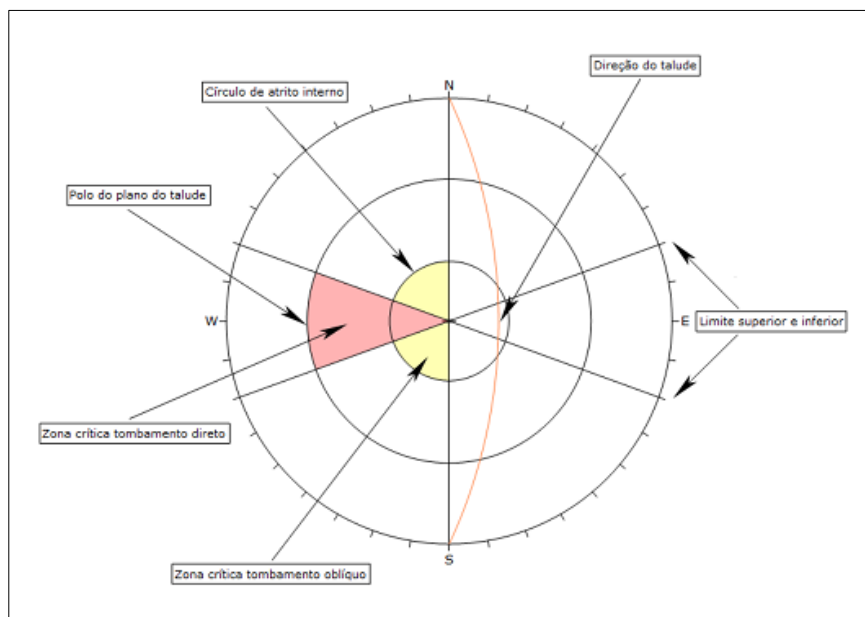
- O tombamento do bloco é característico de rochas fortes, onde as colunas formadas por um conjunto de descontinuidades mergulham abruptamente na face do talude, possuindo uma base de sustentação dos blocos com superfície escalonada. Comumente presente em arenitos e basaltos;
- Já o tombamento por flexão é característico de rochas com colunas contínuas, formadas por descontinuidades bem desenvolvidas, mergulhando abruptamente, quebrando-se por flexão na direção do talude, tendo uma base de sustentação dos blocos não tão bem definida. É bastante comum em xistos e ardósias.

A análise cinemática para obtenção da probabilidade de ruptura com base em projeção estereográfica pode ser empregada, pois a orientação estrutural dos blocos é um fator chave para avaliar as condições de instabilidade. Para essa análise, as descontinuidades plotadas no estereograma são avaliadas para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo e tombamento por flexão. Assim como na ruptura planar, a direção limite em relação ao sentido do plano do talude será de $\pm 20^\circ$ delimitando a zona crítica. Na análise para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo, haverá duas zonas críticas, sendo a primeira para a condição de tombamento oblíquo, delimitada pelo cone de atrito interno e a segunda para a condição de tombamento direto, delimitado pelo polo do plano do talude. Já para análise para

a condição de tombamento do bloco por flexão a zona crítica é formada acima do limite do plano do talude, que é obtido pela soma da inclinação do talude mais o ângulo de atrito interno (GOODMAN, 1989).

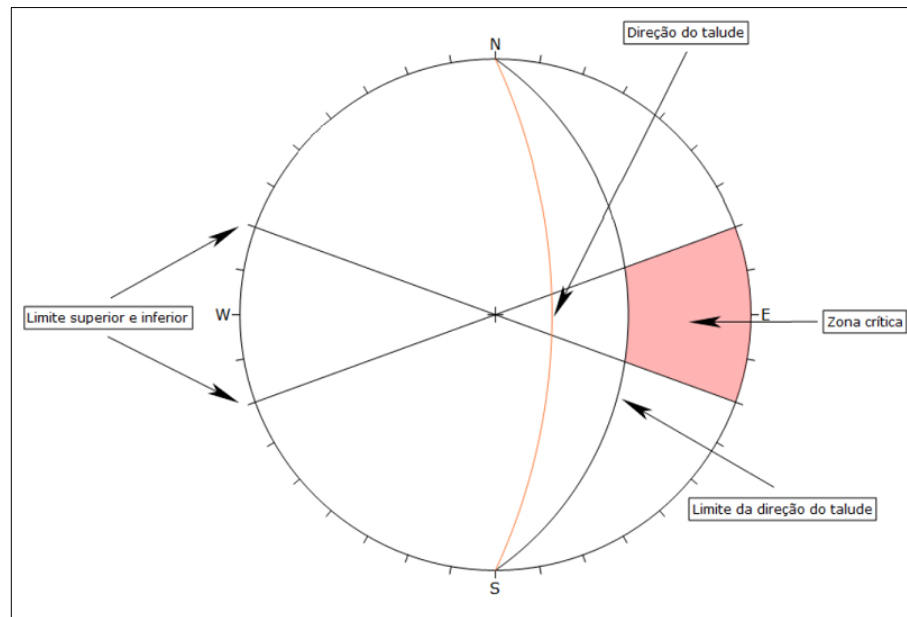
A Figura 27 e 28 ilustram as variáveis consideradas para a avaliação da estabilidade do bloco via projeção estereográfica para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo e tombamento por flexão, respectivamente. Na condição de tombamento do bloco direto e oblíquo, a instabilidade se dará quando as descontinuidades sofrerem interseção e estiverem contidas nas zonas críticas, tendo o tombamento direto a situação que representa uma inclinação maior que o ângulo de atrito interno e menor que a inclinação do talude e o tombamento oblíquo a situação de inclinação menor ou igual ao do ângulo de atrito interno. Já para a condição de tombamento por flexão, a instabilidade se dará quando o polo da descontinuidade estiver contido na zona crítica, que sinaliza um mergulho contrário ao do talude e acima do ângulo de atrito interno (GOODMAN, 1989).

Figura 27 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo em um estereograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Representação das variáveis empregadas para a avaliação cinemática de ruptura por tombamento por flexão em um estereograma



Fonte: Elaborado pelo autor.

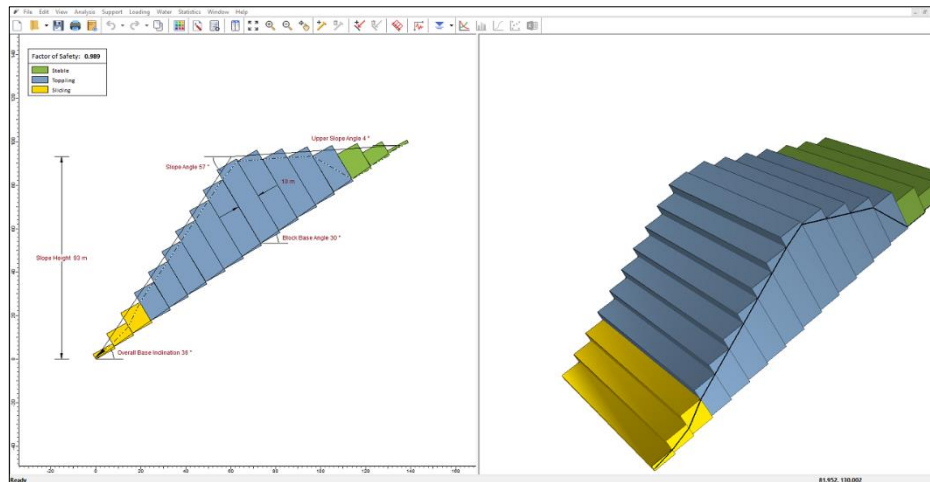
A probabilidade de ruptura para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo, pode ser obtida pela relação entre o número de interseções presentes nas zonas críticas pelo número de interseções presentes no estereograma. Já a probabilidade de ruptura para o tombamento por flexão, é obtida pela relação entre os pólos contidos na zona crítica por todos os pólos presentes no estereograma (GOODMAN, 1989).

A análise determinística por tombamento é uma das mais complexas, pois envolve a avaliação de cada bloco ao longo do talude, dessa forma, o fator de segurança é obtido através de softwares que avaliam toda a extensão desses blocos ao longo do talude. Vários processos interativos são realizados, em que as dimensões dos blocos e as forças que agem em cada um são calculadas, para obtenção das condições de estabilidade ou instabilidade do bloco. Cada bloco avaliado será classificado como estável, tombável e deslizável sendo um dos requisitos importantes para a estabilidade que o ângulo de atrito em cada base do bloco seja maior que o ângulo de mergulho da base (WYLLIE, 2018).

Para essa análise os parâmetros geométricos tais como: inclinação e altura do talude, inclinação e comprimento do topo do talude, inclinação e espaçamento das discontinuidades e inclinação da base fixa dos blocos, devem ser obtidos para o cálculo. Já os parâmetros geomecânicos tais como: peso específico da rocha, coesão, ângulo de atrito interno e parâmetros do critério de ruptura adotado devem também ser obtidos para o cálculo. O nível da água e sua variação ao longo da geometria do talude e porcentagem de saturação podem ser

empregados para o cálculo do fator de segurança (ROCSCIENCE, 2022). A Figura 29 ilustra a tela de visualização do resultado de uma análise do fator de segurança para a condição de ruptura por tombamento no Software RocTople da Rocscience.

Figura 29 - Análise de ruptura por tombamento no Software Slide da Rocscience



Fonte: Rocscience, 2022.

3.9 Seleção da área e das seções alvo do estudo

A área alvo do estudo situa-se no corte de estrada da BR-020, localizada no município de Boa Viagem, no estado do Ceará, essa área foi selecionada devido ao risco geológico de acidentes oriundos do movimento de massa de taludes artificiais sem qualquer tipo de contenção, pois essa rodovia possui uma elevada taxa de fluxo de veículos diários. O acesso à área dá-se a partir de Fortaleza pela BR-020 percorrendo uma distância de 254 km. O município de Boa Viagem é localizado praticamente no centro do estado do Ceará, na microrregião dos Sertões de Canindé e na mesorregião dos Sertões Cearenses.

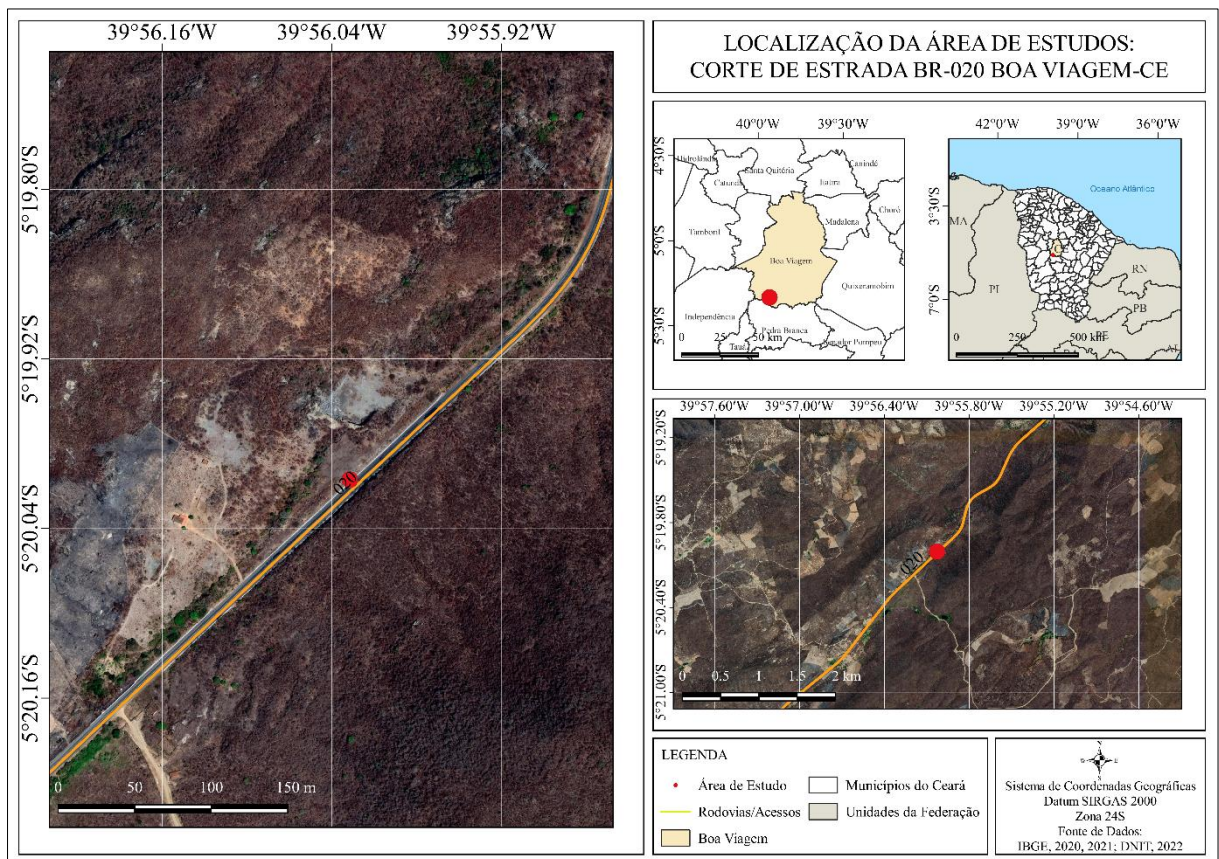
O corte feito para a infraestrutura da rodovia visto na Figura 30 gerou dois taludes, nomeados de talude noroeste e talude sudeste em relação à posição geográfica da rodovia. A partir desses dois taludes foram selecionadas três seções para realização dos estudos, sendo a primeira e a segunda seção no talude sudeste e a terceira seção no talude noroeste, nomeados de TS1, TS2 e TS3, respectivamente. A Figura 31 detalha em um mapa a localização da área de estudo.

Figura 30 - Corte de estrada na BR-020



Fonte: Autor, 2022.

Figura 31 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor, 2022.

A Figura 32 ilustra a seção TS1 de 3 m de comprimento por 6,70 m de altura inclinada, a Figura 33 ilustra a seção TS2 de 7,50 m de comprimento por 6,70 m de altura inclinada e a Figura 35 ilustra a seção TS3 de 5 m de comprimento por 4,46 m de altura inclinada.

Figura 32 - Seção TS1 do talude sudeste



Fonte: Autor, 2022.

Figura 33 - Seção TS2 do talude sudeste



Fonte: Autor, 2022.

Figura 34 - Seção TS3 do talude noroeste



Fonte: Autor, 2022.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

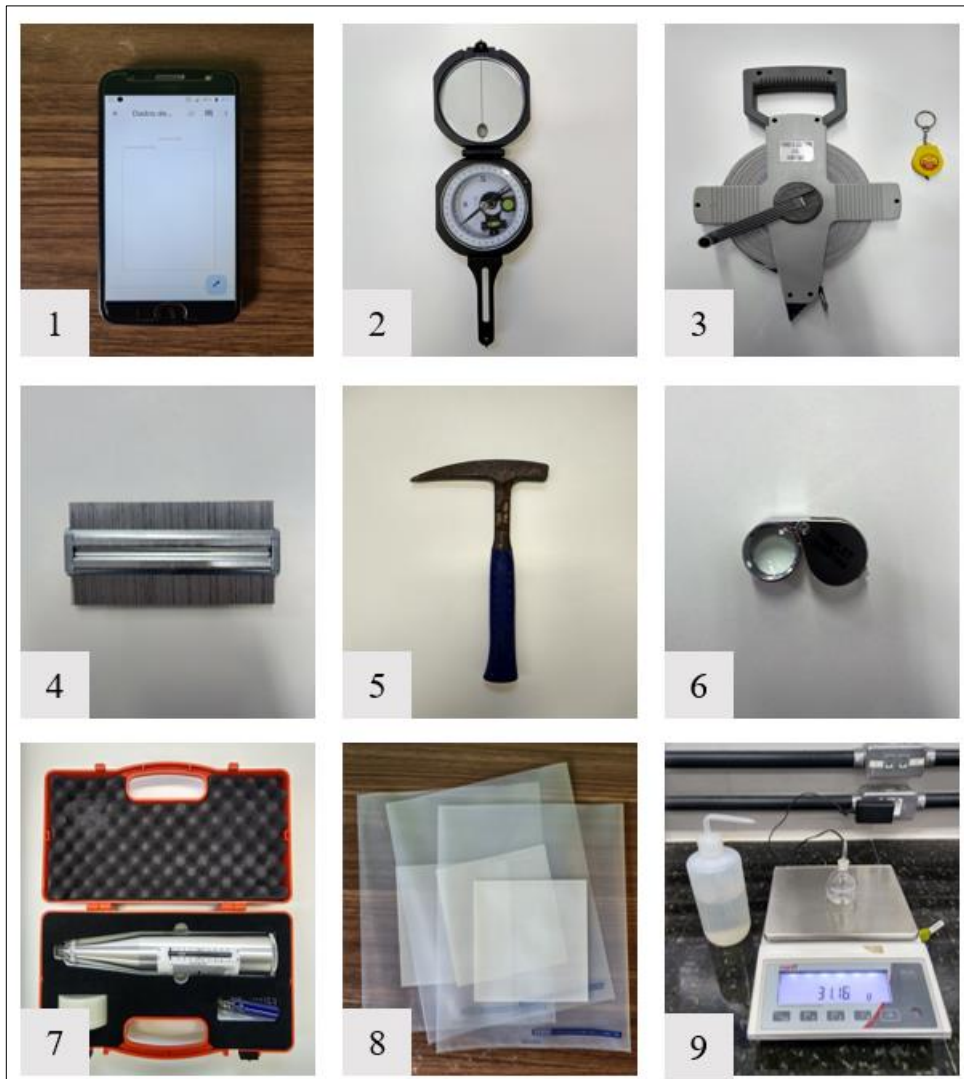
Este trabalho dividiu-se em quatro etapas, sendo elas: mapeamento geológico-geotécnico, projeção estereográfica e análise cinemática-probabilística, análise determinística e análise de sensibilidade. Os materiais empregados e a descrição das atividades realizadas em cada uma dessas etapas encontram-se descritos a seguir.

4.1 Materiais

Os materiais empregados e a descrição do tipo de uso encontram-se logo abaixo. A Figura 35 ilustra os materiais que foram utilizados no trabalho.

- ✓ Smartphone com câmera fotográfica, aplicativo de GPS e caderneta de campo digital¹ para obtenção de fotos do estudo realizado, coordenadas da área alvo do estudo e descrição digital dos dados segundo a metodologia do trabalho;
- ✓ Bússola com clinômetro² para medição da direção do mergulho das discontinuidades e do talude em relação ao norte geográfico e para medição do mergulho das discontinuidades e do talude em relação ao plano horizontal;
- ✓ Trena de fibra de vidro e trena com fita de aço³ para medição do comprimento das seções, altura do plano inclinado das seções do talude, persistência, espaçamento e abertura das discontinuidades;
- ✓ Rugosímetro⁴ para obtenção do perfil padrão de rugosidade das superfícies avaliadas;
- ✓ Martelo geológico⁵ para remoção de amostras e teste de resistência das amostras extraídas das seções do talude;
- ✓ Lupa de bolso⁶ para avaliação da mineralogia e alterabilidade das superfícies das rochas presentes no talude;
- ✓ Martelo de Schmidt⁷ para obtenção do valor de rebote para a rocha predominante no talude;
- ✓ Saco de amostras⁸ para transporte de amostras extraídas das seções avaliadas;
- ✓ Picnômetro, pisseta e balança⁹ para o ensaio de obtenção da densidade.

Figura 35 - Materiais empregados no estudo



Fonte: Autor, 2022.

4.2 Métodos

4.2.1 Mapeamento geológico-geotécnico

Essa etapa foi realizada em campo e consistiu na descrição da geologia e parâmetros geomecânicos das seções TS1, TS2 e TS3 dos taludes a serem avaliados. Para esse estudo os taludes avaliados foram de um corte de estrada da BR-020, localizada no município de Boa Viagem, no estado do Ceará, sendo que, foi feito o mapeamento das estruturas geológicas para três seções mais críticas com comprimento variável, ambos os lados do corte de estrada foram avaliados para uma melhor obtenção dos resultados e direcionamento de possíveis soluções para reduzir o risco de ruptura, caso seja necessário.

Em cada uma das três seções do talude foram descritos os tipos de rocha predominante, mineralogia e estruturas presentes, além da descrição das características geomecânicas das descontinuidades, tais como: orientação, persistência, rugosidade, abertura, espaçamento, intemperismo, resistência das paredes, preenchimento, infiltração, famílias de descontinuidades e o tamanho ou forma dos blocos.

Nessa etapa também foi realizado o levantamento dos parâmetros e cálculo do critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado. Para esse critério, é necessário a estimativa de resistência à compressão uniaxial da rocha intacta nas porções menos alteradas da rocha, sendo feita de forma direta com o uso do martelo de Schmidt, onde se obteve o número de rebotes médio para um total de 10 ensaios em porções diferentes da rocha sem alteração visível. Dessas medições, deu-se a obtenção da moda do valor de rebote e adotou-se um limite de ± 5 em relação à moda para compor os valores para a média do rebote. A correção do valor do rebote decorreu segundo a equação de Aydin & Basu (2005).

Já o peso específico da rocha foi obtido por picnometria com base na norma DNER-ME 093/94, assumindo um número de 3 ensaios, visando obtenção do valor médio para o ensaio em triplicata. O GSI foi determinado com base na carta de avaliação presente na Figura 16 e o fator de distúrbio da rocha, com base na carta de avaliação presente no Quadro 6. Por fim, a altura do talude foi determinada por trigonometria por meio da medição do comprimento da área inclinada e ângulo de inclinação da face do talude, com emprego de uma trena de fibra de vidro e clinômetro da bússola, respectivamente para as medições. De posse desses dados, as constantes do critério, ângulo de atrito e coesão foram calculadas segundo a descrição presente no tópico 2.7.

4.2.2 Projeção estereográfica e análise cinemática-probabilística

A projeção das estruturas geológicas para cada seção do talude avaliado decorreu no formato Dip e Dip Direction com emprego do software Dips da Rocscience (versão 8.021). A análise cinemática foi feita no próprio software utilizado para projeção estereográfica. Nessa análise os parâmetros tais como: ângulo de atrito interno, ângulo de inclinação e direção do talude e das descontinuidades são implementados. Posteriormente as descontinuidades foram avaliadas para cada seção do talude em função das condições de ruptura planar, em cunha, circular e por tombamento, sendo que, em ambas, com exceção da condição de ruptura circular, foi possível obter a probabilidade de ruptura.

Na presença de condições críticas, cada descontinuidade ou família de descontinuidades foram individualizadas para obtenção do ângulo de mergulho e direção, que serão fatores importantes para a abordagem determinística, pois o método cinemático não considera a geometria do talude, resistência da rocha e a influência da água, parâmetros esses que influenciam bastante nas condições de estabilidade do talude.

4.2.3 Análise determinística

Nessa análise, cada tipo de ruptura detectado na análise cinemática-probabilística foi avaliado, visando a obtenção do fator de segurança das descontinuidades críticas em função das tensões resistivas e mobilizadoras. Devido a presença de mais de uma descontinuidade ou família de descontinuidades em situação crítica, foram calculadas individualmente o fator de segurança com uso de softwares e posteriormente a descontinuidade com menor fator de segurança foi apresentada.

Para a ruptura planar o software empregado foi o RocPlane (versão 4.010), na ruptura em cunha o software Swedge (versão 7.017), para ruptura circular o software Slide 2 (versão 9.023) e ruptura por tombamento com o software RocTopple (versão 2.005), ambos pertencentes a Rocscience. Os dados implementados para esses softwares foram: parâmetros do critério de ruptura adotado, peso específico da rocha, altura do talude e comprimento do topo do talude, inclinação da face e crista do talude, mergulho, espaçamento e orientação da descontinuidade crítica, porcentagem do talude saturado.

4.2.4 Análise de sensibilidade

As análises de sensibilidade foram empregadas junto dos resultados das análises cinemáticas-probabilísticas e determinísticas, adotando um limite inferior e superior de um dado parâmetro e a visualização através de gráficos da influência desse parâmetro na probabilidade de ruptura e fator de segurança. Os parâmetros foco dessa análise foram geométricos e geomecânicos e, tanto as análises como a geração de gráficos foram feitas nos mesmos softwares empregados para análises cinemáticas-probabilísticas e determinísticas.

A análise de sensibilidade para as condições de ruptura planar, em cunha e tombamento do bloco direto oblíquo e tombamento por flexão na avaliação cinemática-probabilística, foi realizada no parâmetro geomecânico uma variabilidade no ângulo de atrito interno, assumindo um limite inferior de -5° e superior de $+5^\circ$ com variação a cada 1° do

ângulo de atrito interno encontrado. Para a geometria do talude foi feita uma varredura na inclinação para um intervalo entre 45° a 90° , com variação a cada 1° .

Já a análise de sensibilidade para as condições de ruptura planar, em cunha e tombamento do bloco direto oblíquo e tombamento por flexão na avaliação determinística realizou-se no parâmetro geomecânico uma variabilidade na porcentagem de saturação do talude, assumindo um intervalo entre 0% a 100% com variação a cada 1%. Para a geometria do talude foi feita uma varredura na inclinação para um intervalo entre 45° a 90° , com variação a cada 1° e, para a condição de tombamento do bloco direto oblíquo e tombamento por flexão verificou-se a variabilidade no valor da inclinação basal proposta por Goodman & Bray (1976) entre 47° a 67° , com variação a cada 1° .

A partir da inserção desses intervalos de variação dos parâmetros geométricos e geomecânicos nos mesmos softwares empregados para análises cinemáticas e determinísticas, foram gerados gráficos de probabilidade de ruptura e fator de segurança em função das variações desses dados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados foram estruturados da seguinte forma: mapeamento geológico-geotécnico englobando as três seções do talude e projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade e análise determinística e de sensibilidade, individualizado para cada seção do talude.

5.1 Mapeamento geológico-geotécnico

O resultado do mapeamento geológico-geotécnico foi descrito englobando as três seções do talude, sendo dividido em uma breve descrição geológica, uma maior ênfase na descrição geomecânica e por fim, os cálculos e resultados dos parâmetros do critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado.

5.1.1 Descrição geológica

As três seções selecionadas para realização dos estudos deste presente trabalho situam-se na cidade de Boa Viagem no estado do Ceará. Essa região do ponto de vista geológico está inserida na Província Borborema que representa o extremo nordeste da plataforma Sul-americana, caracterizado por atividade tectônica intensa ao final do Proterozóico, consequência de colisão continental envolvendo os crátons São Luís-Oeste África e São Francisco-Congo. A colisão, correspondendo ao Ciclo Brasileiro-Pan-Africano, completou-se, no caso da Província Borborema, por volta de 600 a 550 Ma (CPRM, 2008).

O corte de estrada da BR-020 na cidade de Boa Viagem, abrange o domínio Ceará Central, esse domínio é produto de longa e complexa história geológica, iniciada nos tempos arqueanos, com vários episódios de acreção crustal e vários ciclos orogênicos que deixaram seus registros magmáticos, metamórficos e deformacionais. Em função das coordenadas das seções TS1, TS2 e TS3. A área está inserida no Complexo Cruzeta, termo empregado por Cavalcante *et al.* (2002) para caracterizar a associação polimetamórfica que se assemelha a uma forma elipsoidal estendendo-se entre a cidade de Tauá até Madalena (CPRM, 2008).

A litologia observada nos taludes sudeste e noroeste do corte de estrada, Figura 36 e 37, respectivamente, é de gnaisses migmatíticos apresentando bandamento bastante complexo, alternando em níveis de composição variada. No talude sudeste os gnaisses possuem componentes granodioríticos sobre os componentes tonalíticos a graníticos, já no talude

noroeste há frequentes intercalações boudinadas de rochas máficas e ultramáficas nos gnaisses que representam restos dilacerados de complexos acamadados. Os minerais vistos a olho nu e com auxílio de uma lupa de bolso são: quartzo, feldspatos (principalmente potássico), biotita, epidoto, anfibólio, muscovita, piroxênio e sulfetos.

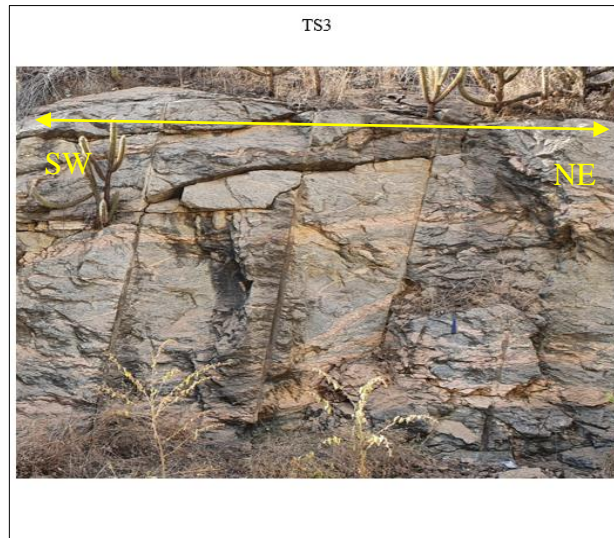
Com base na folha de Boa Viagem (SB.24-V-D-II), a área alvo do estudo é constituída predominantemente da rocha classificada como ortognaisse bandado com presença de xistosidade de alta temperatura. Dobras intrafoliais centimétricas a métricas são comuns, resultado de uma intensa transposição, já a foliação é geralmente de baixo ângulo, sofrendo uma verticalização numa faixa estreita ao longo da BR-020. As lineações de estiramento mineral tendem a ser paralelas a direção da foliação, indicando um transporte tectônico quase transcorrente (CPRM, 2008).

A vegetação na área é composta predominantemente por espécies da caatinga hiperxerófila com domínio na localização do estudo de espécies arbustivas. A rede de drenagem é constituída por cursos d'água intermitentes sazonais de pequena energia, formando vales largos e configurando um padrão de drenagem predominantemente dendrítico, já a geomorfologia possui uma feição classificada como Maciço Residual, compreendendo um conjunto de serras e pequenos serrotes que se mostram orientados grosseiramente NE-SW, apresentando níveis altimétricos em torno de 450 a 500 m. Os solos da área são oriundos principalmente da alteração “in situ” de gnaisses ou de materiais colúviais mobilizados a partir dessa rocha. As associações dominantes, incluem solos litólicos, brunos não cálcicos, planossolos solódicos, solonetz solodizados e podzólicos vermelho amarelo (CPRM, 2008).

Figura 36 - Litologia e características da superfície do talude sudeste para as seções TS1 e TS2



Figura 37 - Litologia e características da superfície do talude noroeste para a seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

5.1.2 Descrição geomecânica

A região da área de estudo possui clima semiárido com elevados índices de evaporação e evapotranspiração durante todo o ano, com uma temperatura média anual de 29° . Predomina na região a estação de seca entre os meses de julho a dezembro, com períodos chuvosos entre janeiro e junho, com uma pluviosidade média anual de 700 mm (CPRM, 2008).

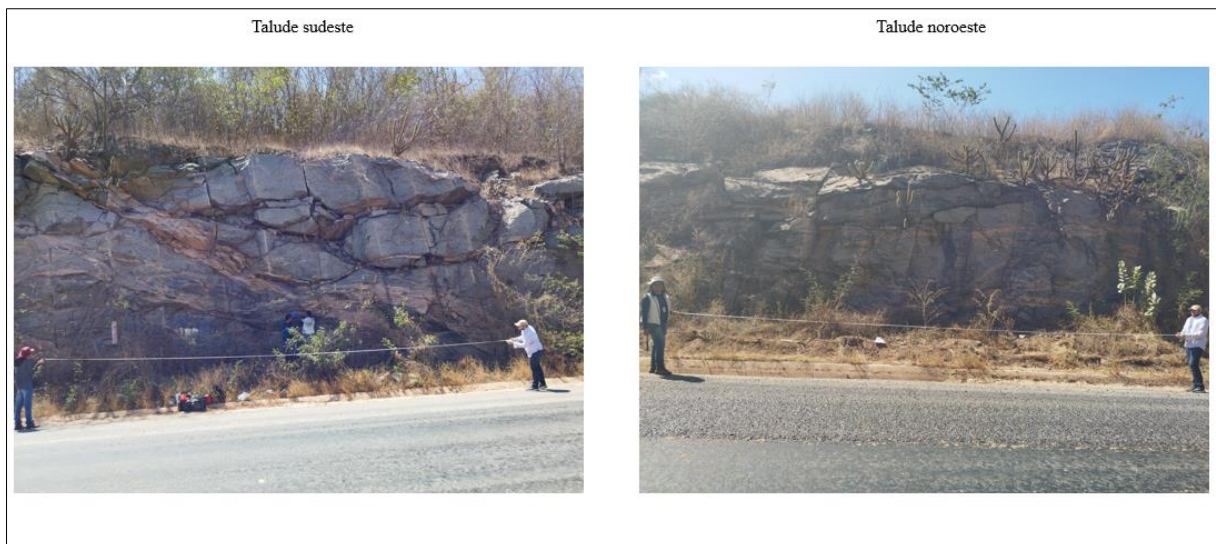
Ambos os taludes sudeste e noroeste são do tipo artificial com inclinações superiores a 75° , resultado de escavações com emprego de explosivos. É possível notar nos dois taludes que tanto o plano de perfuração e de detonação não foram bem elaborados, pois é visível nos taludes remanescentes desvios nos furos bastante elevado em quase todos os furos, além do excesso de fraturas radiais e fraturas de alívio altamente induzidas por uma razão de carregamento elevada e não condizente com o emprego de desmontes esculturais de pré-corte ou pré-fissuramento. A Figura 38 detalha a superfície dos taludes remanescentes sudeste e nordeste com enfoque nos desvios e perturbações no maciço rochoso.

Os taludes possuem várias famílias de discontinuidades, direcionando para uma abordagem de estabilidade bastante influenciada pela geologia estrutural, sendo classificado na classe de maciço rochoso para avaliação de resistência. Há predomínio nos taludes de pequenos blocos oblíquos quase que soltos e blocos maiores com aparência de maior estabilidade, além de cunhas altamente visíveis e também com aparência de maior estabilidade. Com base nas observações de campo em elevada escala e que podem também serem vistas nas Figuras 36 e

37, as discontinuidades dominantes são fraturas de extensão com predomínio de fissuras e veios com também presença de juntas, há também fraturas de cisalhamento em uma menor presença nos taludes.

Outras discontinuidades observadas nos taludes em menor escala são falhas normais, dobras, foliações metamórficas e de xistosidade, devido a rocha ser um ortognaisse bandado com xistosidade, margem de intrusão ígnea na seção TS2 com um dique de rocha granodiorito intrudido na área e por fim, não há presença de fendas de tração nos topos dos taludes. As características geomecânicas das seções TS1, TS2 e TS3 são descritas de forma mais detalhada logo abaixo.

Figura 38 - Taludes remanescentes sudeste e noroeste com visualização dos desvios nos furos, perturbação no maciço rochoso e características estruturais

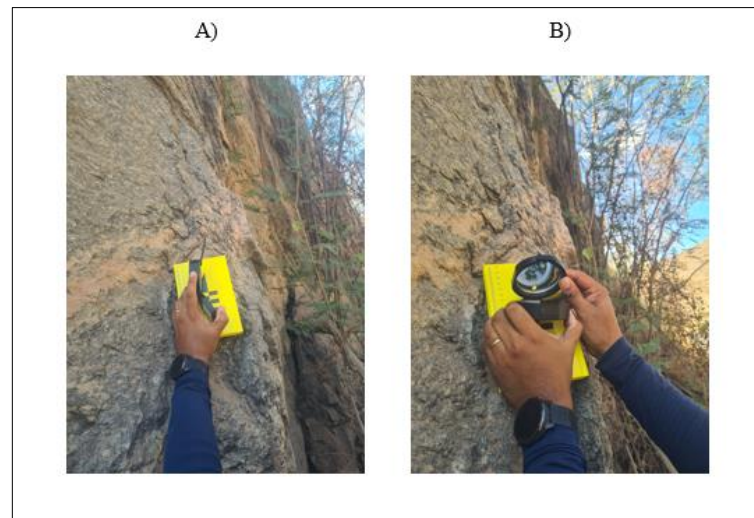


Fonte: Autor, 2022.

- **Orientação**

A orientação das discontinuidades para as seções, foram medidas em relação às foliações e fraturas visíveis e acessíveis em função da altura do talude, tomando como base 10 medições amostrais de famílias identificadas, sendo que, as discontinuidades vistas como críticas foram dadas preferência nas medições. A Figura 39 ilustra o procedimento adotado em campo para a medição do dip (A) e dip direction (B), já as Tabelas 5, 6 e 7 trazem a medição do Dip e Dip Direction das discontinuidades, respectivamente para as seções TS1, TS2 e TS3 dos taludes sudeste e noroeste.

Figura 39 - Procedimento adotado em campo para a medição do dip (A) e dip direction (B)



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 5 - Orientação das descontinuidades na seção TS1

Dip	Dip Direction
69	8
68	19
63	22
39	320
45	179
29	75
86	58
87	286
85	144
83	293

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 6 - Orientação das descontinuidades na seção TS2

(continua)

Dip	Dip direction
8	186
90	226
90	170
90	234
50	70
79	340

Tabela 7 - Orientação das descontinuidades na seção TS2

(conclusão)

Dip	Dip direction
2	234
14	46
35	300
74	160

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 8 - Orientação das descontinuidades na seção TS3

Dip	Dip direction
84	160
87	122
69	196
89	108
27	35
60	246
81	168
88	258
89	100
46	0

Fonte: Autor, 2022.

- Persistência

Devido às descontinuidades das seções avaliadas possuírem muitas orientações diferentes, acarretou a dificuldade para obtenção direta do valor da persistência média, optando pela técnica indireta proposta por Pahl (1981). Os dados adotados para o cálculo da persistência para as seções TS1, TS2 e TS3 foram respectivamente os seguintes:

- Alturas (L_1) = 6,70 m; 6,70 m; 4,46 m
- Comprimentos (L_2) = 3 m; 7,50 m; 5 m
- ângulos de mergulho médios das descontinuidades (Ψ) = 65,40°; 53,20°; 72°
- Número total de descontinuidades nas áreas (N'') = 21; 34; 16
- Número de descontinuidades contidas nas áreas (N_c) = 13; 22; 11
- Número de descontinuidades que cortam as áreas (N_t) = 8; 12; 5

$$H' = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 \cdot \cos \Psi + L_2 \cdot \sin \Psi} = \frac{6,70 \cdot 3}{6,70 \cdot \cos 65,40^\circ + 3 \cdot \sin 65,40^\circ} = 3,64$$

$$m = \frac{(N_t - N_c)}{(N'' + 1)} = \frac{8 - 13}{21 + 1} = -0,227$$

$$L = H' \cdot \frac{(1 + m)}{(1 - m)} = 3,64 \cdot \frac{1 - 0,227}{1 + 0,227} = 2,29 \text{ m}$$

Com base no método proposto e no exemplo do cálculo empregado logo acima com os dados da seção TS1, a persistência média encontrada para a seção TS1 é de 2,29 m. Já para a seção TS2 a persistência média encontrada é de 1,73 m. E para a seção TS3 a persistência média encontrada é de 2,78 m. Sendo todas classificadas como persistência pequena para medições entre 1 m a 3 m.

- Rugosidade

O perfil padrão de rugosidade das discontinuidades presentes nas seções foi obtido com uso do rugosímetro de 15 cm. A seção TS1 possui dois padrões dominantes, sendo eles de perfil ondulada e plana. Sendo o perfil ondulada classificado na classe V como lisa e o perfil plana classificado na classe VIII como lisa. Já para a seção TS2 os dois padrões dominantes foram de perfil recortada e ondulada. E para a seção TS3 os dois padrões dominantes foram também o de perfil recortada e ondulada. Sendo que, para as seções TS2 e TS3 o perfil recortado é classificado na classe I como rugosa e o perfil ondulada é classificado na classe IV como rugosa.

- Abertura

As discontinuidades presentes nas seções apresentaram aspecto de discontinuidades parcialmente abertas, com um valor médio de abertura de 2 mm; 0,75 mm e 1,55 mm respectivamente para as seções TS1, TS2 e TS3. Sendo todas classificadas como abertas.

- Espaçamento

O espaçamento das discontinuidades em função das famílias identificadas em campo foi de 2,50 cm; 4 cm; 6 cm e 90 cm para a seção TS1, 7 cm; 10,25 cm; 70 cm e 93 cm para a seção TS2 e 9 cm; 25 cm e 49 cm para a seção TS3, sendo todos esses espaçamentos reais e não relativos a inclinação. Sendo classificados em muito próximos para medições entre

2 e 6 cm, próximos para medições entre 6 a 20 cm, moderado para medições entre 20 e 60 cm e grande para medições entre 60 cm a 2 m.

- **Intemperismo**

O intemperismo atuante nas seções dos taludes é físico e químico. Para a seção TS1 e TS3 a atuação do intemperismo é em proporções muito baixas, sendo identificado em campo nenhum sinal visível a olho nu de minerais alterados, com uma leve descoloração na superfície da descontinuidade. Sendo ambas classificadas como parede sã. Já para a seção TS2 a atuação do intemperismo é em proporções moderadas, sendo identificado em campo descoloração e mudança de cor dos minerais, sinalizando alterações na superfície das descontinuidades. Sendo classificada como parede levemente alterada. A Figura 40 ilustra a condição de intemperismo nas paredes das seções TS1, TS2 e TS3.

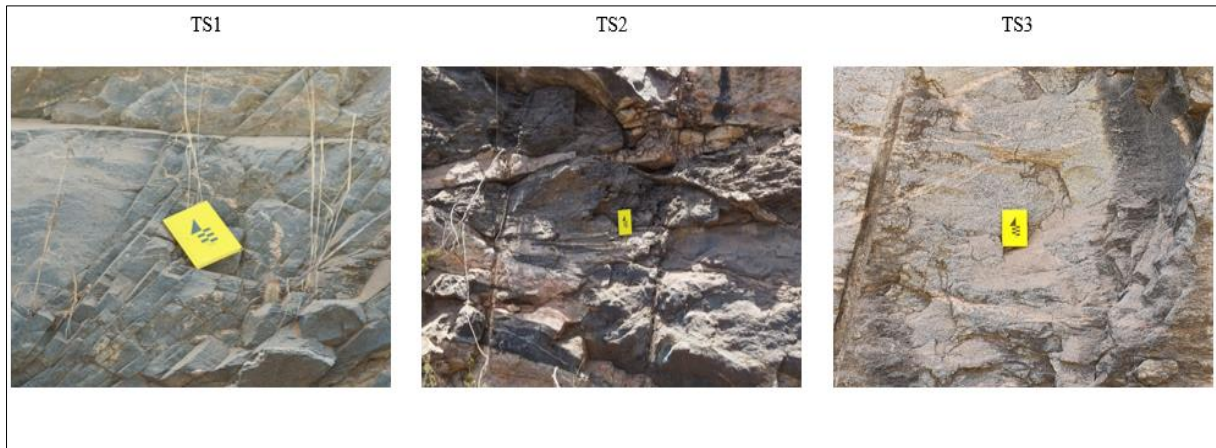
- **Resistência das paredes**

A avaliação da resistência das paredes para as seções foi feita de forma simples, com uso do martelo geológico para uma amostra extraída de cada seção dos taludes. Para a seção TS1 e TS3 a amostra requereu mais de um golpe de martelo para fraturá-la. Sendo ambas classificadas na classe R4 como rocha resistente, com uma faixa aproximada de resistência à compressão uniaxial de 50 - 100 Mpa. Já para a seção TS2 a amostra requereu muitos golpes de martelo para fraturá-la. Sendo classificada na classe R5 como rocha muito resistente, com uma faixa aproximada de resistência à compressão uniaxial de 100 - 250 Mpa.

- **Preenchimento**

A identificação em campo do preenchimento para as descontinuidades presentes nas seções TS1 e TS2 do talude, foi de nenhum material preenchendo as aberturas das descontinuidades. Sendo designadas como sem preenchimento. Já para a seção TS3 a identificação em campo do preenchimento para as descontinuidades presentes na seção do talude, foi de presença de argila mole com espessura menor que 5 mm. Sendo designada como preenchimento favorecendo o deslocamento. A Figura 40 ilustra o não preenchimento das descontinuidades para as seções TS1 e TS2 e o preenchimento das descontinuidades para a seção TS3.

Figura 40 - Condições de intemperismo e preenchimento em TS1, TS2 e TS3



Fonte: Autor, 2022.

- **Infiltração**

A avaliação das condições de infiltração para as discontinuidades presentes nas seções TS1 e TS2 do talude foi de discontinuidades sem preenchimento, com fraturas secas e com evidências de favorecimento à percolação de água. Sendo classificadas como da classe III designadas de moderadamente secas. Já para a seção TS3 a avaliação das condições de infiltração para as discontinuidades, foi de discontinuidades com preenchimento, favorecendo a umidade e formação de gotas dependendo da condição da presença de água. Sendo classificadas como da classe III designadas também de moderadamente secas. A Figura 41 traz a condição de infiltração presentes nas seções TS1, TS2 e TS3.

- **Famílias de discontinuidades**

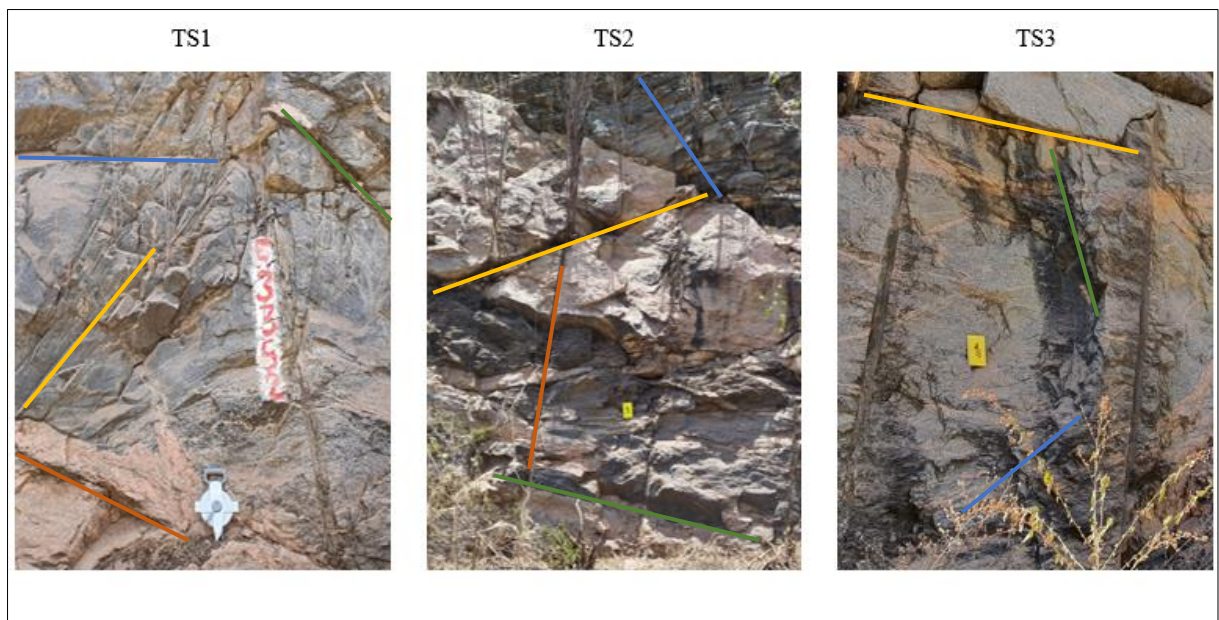
O maciço rochoso das seções TS1 e TS2 do talude analisado, que apresenta classificação VIII, possuem muitas discontinuidades aleatórias, sendo identificado de forma clara 4 famílias predominantes para ambos. Já para a seção TS3, que possui classificação VII, o maciço rochoso dessa seção possui muitas discontinuidades aleatórias, sendo identificado de forma clara 3 famílias predominantes. A Figura 41 ilustra as famílias de discontinuidades presentes nas seções TS1, TS2 e TS3, sendo a cor do traço amarelo representando a família 1, verde família 2, azul família 3 e laranja família 4.

- **Tamanho ou forma dos blocos**

Para a seção TS1 com 3 m de comprimento e 6,70 m de altura inclinada, há presença de mais de 15 discontinuidades, tendo uma relação discontinuidades por unidade de volume

mapeada menor que 1. Já para a seção TS2 com 7,5 m de comprimento e 6,70 m de altura inclinada, há presença de mais de 20 descontinuidades, tendo também uma relação descontinuidades por unidade de volume mapeada menor que 1. E para a seção TS3 com 5 m de comprimento e 4,46 m de altura inclinada, há presença de mais de 25 descontinuidades, tendo uma relação descontinuidades por unidade de volume mapeada entre 1 a 3. Sendo classificados como blocos muito grandes para medições de descontinuidades/m³ <1 e classificados como blocos grandes para medições de descontinuidades/m³ entre 1 a 3. A Figura 41 ilustra o tamanho ou forma dos blocos presentes nas seções TS1, TS2 e TS3.

Figura 41 - Visualização da condição de infiltração, famílias de descontinuidades e forma dos blocos nas seções TS1, TS2 e TS3



Fonte: Autor, 2022.

5.1.3 Critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado

A seguir será descrito o procedimento empregado para obtenção dos parâmetros geomecânicos e das constantes do critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado e também os parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno para as seções TS1, TS2 e TS3.

- Obtenção do valor de rebote médio a partir dos valores de rebote do Martelo de Schmidt e correção do valor médio obtido

As medições do rebote com emprego do Martelo de Schmidt foram realizadas em porções não alteradas da rocha presentes nas seções TS1, TS2 e TS3 avaliada, tendo

inicialmente avaliado o choco de cada área, visando evitar perda de energia devido a propagação não homogênea da energia de impacto. A Figura 42 ilustra o procedimento empregado para medição do rebote em áreas não alteradas da rocha, já as Tabelas 8, 9 e 10 trazem às medições feitas nas porções sã da rocha para as seções TS1, TS2 e TS3 respectivamente.

Figura 42 - Procedimento empregado para medição do rebote com emprego do Martelo de Schmidt



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 9 - Valores de rebote da seção TS1

Medições	Rebote
H_{r1}	47
H_{r2}	54
H_{r3}	43
H_{r4}	52
H_{r5}	52
H_{r6}	42
H_{r7}	54
H_{r8}	54
H_{r9}	51
H_{r10}	58

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 10 - Valores de rebote da seção TS2

Medições	Rebote
H_{r1}	53
H_{r2}	52
H_{r3}	60
H_{r4}	38
H_{r5}	47
H_{r6}	60
H_{r7}	61
H_{r8}	61
H_{r9}	59
H_{r10}	53

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 11 - Valores de rebote da seção TS3

Medições	Rebote
H_{r1}	57
H_{r2}	45
H_{r3}	44
H_{r4}	45
H_{r5}	44
H_{r6}	49
H_{r7}	60
H_{r8}	54
H_{r9}	50
H_{r10}	60

Fonte: Autor, 2022.

De posse das 10 medições, decorreu a obtenção da moda dos valores de rebote e posteriormente os dados foram filtrados com valor entre ± 5 da moda para composição da média. Por fim, esse número foi corrigido devido o martelo utilizado ser do tipo N. A equação de Aydin & Basu (2005) foi empregada, sendo o cálculo abaixo um exemplo com o valor de rebote médio da seção TS2.

$$H_{rL} = \frac{H_{rN} - 6,3673}{1,0646} = \frac{60,20 - 6,3673}{1,0646} = 50,57$$

A seção TS1 apresentou uma moda do valor de rebote de 54 e com os dados filtrados gerou uma média de 53,57; com a correção, o valor de rebote L para essa seção será de 44,34. Já a seção TS2 apresentou uma moda do valor de rebote de 60 e com os dados filtrados gerou uma média de 60,20; com a correção, o valor de rebote L para essa seção será de 50,57. E a seção TS3 apresentou uma moda do valor de rebote de 45 e com os dados filtrados gerou uma média de 46,17; com a correção, o valor de rebote L para essa seção será de 37,38. Esses dados de rebote corrigidos são importantes para obtenção da resistência à compressão uniaxial.

- Densidade da rocha

A obtenção da densidade da rocha decorreu por ensaio de picnometria, a partir da pulverização das amostras extraídas do talude sudeste e talude noroeste avaliados. A Figura 43 ilustra o pó extraído das amostras após o corte com uma serra mármore e a Figura 44 o passo a passo empregado para o ensaio. A Tabela 11 e 12 mostram os valores obtidos para o cálculo da densidade, a densidades para os três ensaios e a densidade média segundo a norma DNER-ME 093/94. Sendo o valor da densidade média para o talude sudeste das seções TS1 e TS2 igual a $2,46 \text{ g/cm}^3$, com peso específico igual a $0,0246 \text{ MN/m}^3$, e a densidade média para o talude noroeste da seção TS3 igual a $2,54 \text{ g/cm}^3$, com peso específico igual a $0,0254 \text{ MN/m}^3$. Ambas as densidades obtidas são bem próximas do valor médio do gnaíse sem alteração que é de $2,6 \text{ g/cm}^3$, mas como se trata de uma rocha alterada esses valores tendem a serem diferentes.

Figura 43 - Cortes por serra mármore das amostras dos taludes sudeste e noroeste e pó das rochas extraídas dessas amostras

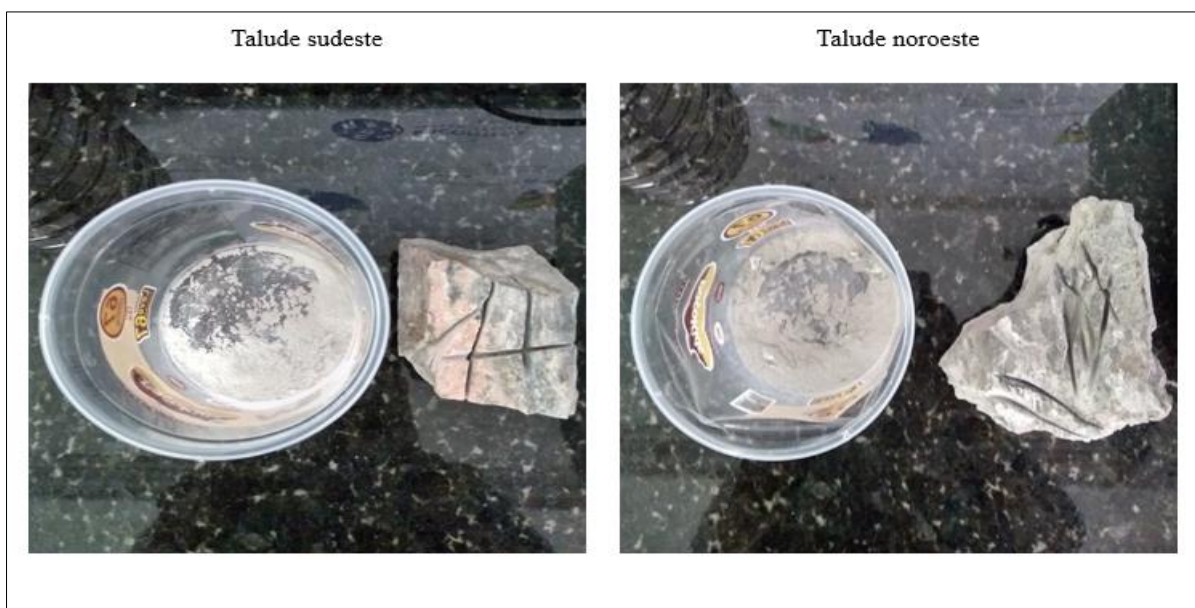
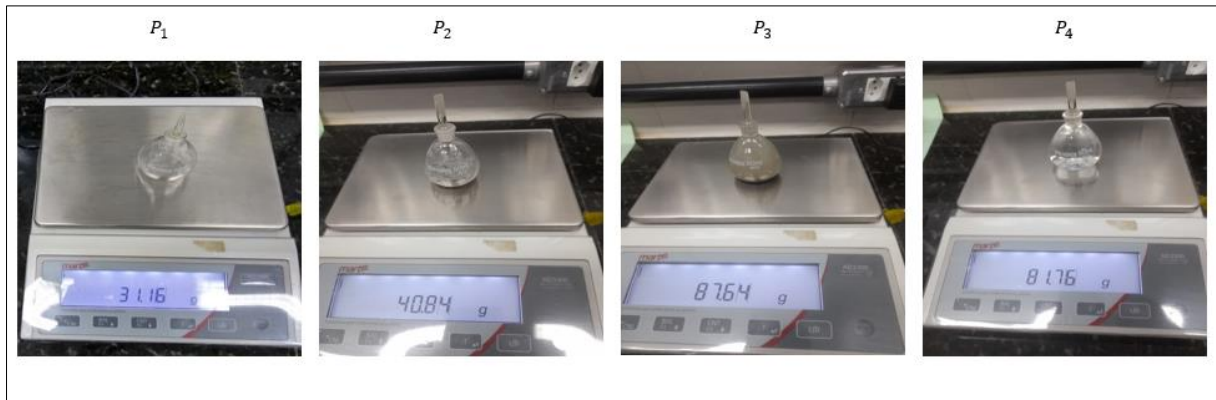


Figura 44 - Passo a passo do procedimento empregado para o ensaio de densidade por picnometria



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 12 - Valores obtidos para o cálculo da densidade, a densidades para os três ensaios e a densidade média do talude sudeste

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
P_1	30,71	30,77	30,74
P_2	40,06	40,20	40,51
P_3	86,13	86,24	86,49
P_4	80,64	80,64	80,64
Densidade	2,42	2,46	2,49
Densidade média		2,46	

Fonte: Autor, 2022.

Tabela 13 - Valores obtidos para o cálculo da densidade, a densidades para os três ensaios e a densidade média do talude noroeste

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
P_1	31,14	31,19	31,18
P_2	40,75	40,84	40,57
P_3	87,64	87,65	87,38
P_4	81,76	81,76	81,76
Densidade	2,57	2,56	2,49
Densidade média		2,54	

Fonte: Autor, 2022.

- Resistência à compressão uniaxial

O cálculo da resistência à compressão uniaxial para as seções TS1, TS2 e TS3 avaliadas, desenvolveu-se utilizando a equação de Deere & Miller (1966). Para obtenção dessa resistência é necessário o valor de rebote e densidade da rocha, ambos já obtidos para as três

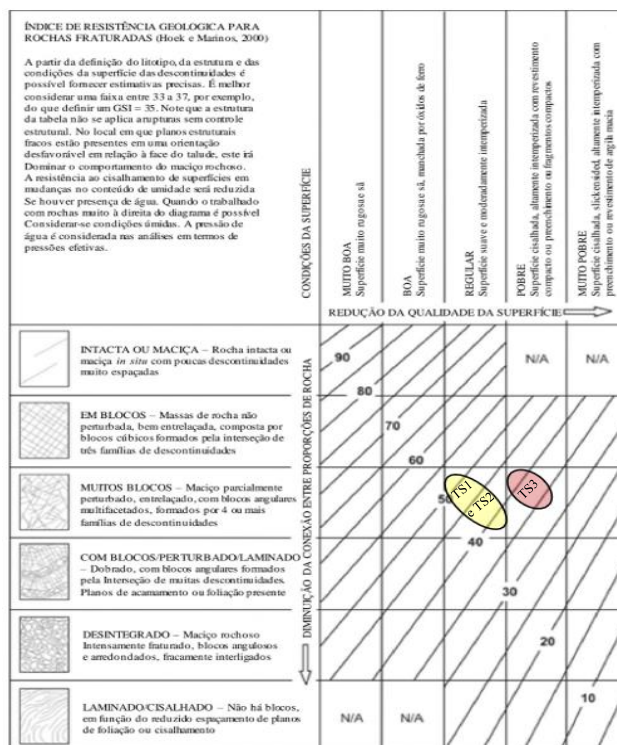
seções. O cálculo disposto logo abaixo é um exemplo com os dados da seção TS3. O valor de resistência à compressão uniaxial da rocha para a seção TS1 é de 88,25 Mpa. Já o valor de resistência à compressão uniaxial da rocha para a seção TS2 é de 119,86 Mpa. E o valor de resistência à compressão uniaxial da rocha para a seção TS3 é de 66,83 Mpa. Esses valores de resistência encontram-se dentro do intervalo estimado pelo teste do martelo geológico.

$$\sigma_{ci} = 9,97 \cdot e^{(0,02 \cdot H_{rL} \cdot \gamma)} = 9,97 \cdot e^{(0,02 \cdot 37,38 \cdot 2,54)} = 66,83 \text{ MPa}$$

▪ GSI

O GSI obtido deu-se com base na carta de avaliação proposta por Hoek *et al.* Para as seções TS1, TS2 e TS3 a condição estrutural avaliada em campo foi de um maciço rochoso com muitos blocos parcialmente perturbado, entrelaçado com blocos angulares e formado por 4 famílias de descontinuidades, a condição de superfície para as seções TS1 e TS2 é regular suave e moderadamente intemperizada, já a seção TS3 a condição de superfície é pobre, com aspecto cisalhado, altamente intemperizada e preenchimentos compactos. O valor do GSI adotado para as seções TS1 e TS2 é entre 40 a 50 e para a seção TS3 é entre 35 a 40. A Figura 45 demonstra o intervalo de valor considerado para as seções.

Figura 45 - GSI das seções

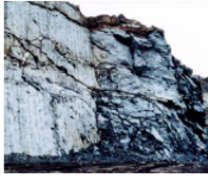



Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 2013; Autor, 2022.

- Fator de distúrbio

O fator de distúrbio considerado foi para obras civis, devido a ambos os taludes serem de um corte de estrada. O método de escavação observado decorreu com uso de explosivos, gerando uma péssima detonação, perturbando bastante o maciço remanescente. Sendo o valor a ser empregado para as seções TS1, TS2 e TS3 igual a 1, como pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 - Fator de distúrbio das seções TS1, TS2 e TS3

Aparência do maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Sugestão do valor de D
	A detonação de pequena escala em taludes de engenharia civil resulta em danos modestos no maciço rochoso, particularmente se a detonação controlada for usada como mostrado no lado esquerdo da fotografia. No entanto, o alívio de tensão resulta em alguma perturbação.	D = 0.7 Boa detonação D = 1.0 Péssima detonação
	Taludes muito grandes de minas a céu aberto sofrem perturbações significativas devido a detonação de produção e o alívio de tensão da remoção de estéril. Em rochas mais macias, a escavação pode ser realizada de forma mecanizada com o grau de dano ao maciço rochoso sendo menor.	D = 1.0 Detonação de produção D = 0.7 Escavação mecanizada

Fonte: Adaptado de Hoek *et. al.*, 2002; Autor, 2022.

- Altura dos taludes

A obtenção da altura do talude desenvolveu-se a partir do valor medido da distância entre o pé e a crista do talude. Posteriormente, com a inclinação do talude realizou-se o cálculo da altura vertical. O cálculo disposto logo abaixo emprega os valores da seção TS1 como exemplo. A seção TS1 possui uma distância entre o pé e a crista do talude de 6,70 m com uma inclinação da face do talude de 87°, gerando uma altura de 6,69 m. Já a seção TS2 também possui uma distância entre o pé e a crista do talude de 6,70 m mais com uma inclinação da face do talude de 81°, gerando uma altura de 6,62 m. E a seção TS3 possui uma distância entre o pé e a crista do talude de 4,46 m com uma inclinação da face do talude de 78°, gerando uma altura de 4,36 m.

$$H_R = \sin \psi_f \cdot H_I = \sin 87^\circ \cdot 6,70 = 6,69 \text{ m}$$

- Constantes do critério

A obtenção das constantes do critério dá-se com base nos valores de GSI, fator de distúrbio e constante do material, segundo as equações propostas no critério de Hoek-Brown Generalizado (2002). O GSI e fator de distúrbio para as seções TS1, TS2 e TS3 foram obtidos acima e a constante do material para Gnaisse segundo o Anexo C é igual a 28. O cálculo logo abaixo e empregado para obtenção das constantes m_b , s e a e utiliza os valores de GSI, fator de distúrbio e constante do material da seção TS2 que são os mesmos da seção TS1 como exemplo. Para as seções TS1 e TS2 que possuem o mesmo valor de GSI, fator de distúrbio e constante do material, os valores das constantes m_b , s e a são respectivamente 0,551; 0,0001 e 0,508. Já para a seção TS3 que possui valor de GSI diferente, os valores das constantes m_b , s e a são respectivamente 0,322; 0,0000299 e 0,513.

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) = 28 \cdot \exp\left(\frac{45 - 100}{28 - 14 \cdot 1}\right) = 0,551$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) = \exp\left(\frac{45 - 100}{9 - 3 \cdot 1}\right) = 0,0001$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-45/15} - e^{-20/3}) = 0,508$$

- Critério de ruptura

Com as constantes obtidas e o valor de resistência à compressão uniaxial, a equação do critério pode ser montada. As equações do critério logo abaixo são respectivamente para as seções TS1, TS2 e TS3.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a = \sigma'_3 + 88,25 \cdot \left(0,551 \cdot \frac{\sigma'_3}{88,25} + 0,0001 \right)^{0,508}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a = \sigma'_3 + 119,86 \cdot \left(0,551 \cdot \frac{\sigma'_3}{119,86} + 0,0001 \right)^{0,508}$$

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a = \sigma'_3 + 66,83 \cdot \left(0,322 \cdot \frac{\sigma'_3}{66,83} + 0,0000299 \right)^{0,513}$$

▪ Ângulo de atrito interno e coesão

A obtenção do ângulo de atrito interno e coesão é a parte mais complexa, pois envolve os valores das constantes do critério, resistência, altura e peso específico além de várias equações a serem empregadas, mas de posse desses dados já previamente encontrados, basta apenas seguir a ordem de cálculo disposta logo abaixo com os dados da seção TS3 como exemplo. Para a seção TS1 o valor do ângulo de atrito interno é de 59,39° e a coesão do material é de 0,129 Mpa. Já para a seção TS2 o valor do ângulo de atrito interno é de 61,07° e a coesão do material é de 0,155 Mpa. E para a seção TS3 o valor do ângulo de atrito interno é de 56,30° e a coesão do material é de 0,065 Mpa.

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

$$\sigma'_{cm} = 66,83 \cdot \frac{(0,322 + 4 \cdot 2,99 \cdot 10^{-5} - 0,513(0,322 - 8 \cdot 2,99 \cdot 10^{-5}))(0,322/4 + 2,99 \cdot 10^{-5})^{0,513-1}}{2(1+0,513)(2+0,513)}$$

$$\sigma'_{cm} = 4,698 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{3max} = \sigma'_{cm} \cdot 0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91}$$

$$\sigma'_{3max} = 4,698 \cdot 0,72 \left(\frac{4,698}{0,0254 \cdot 4,36} \right)^{-0,91} = 0,1117 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} = \frac{0,1117}{66,83} = 0,0017$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right]$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6 \cdot 0,513 \cdot 0,322(2,99 \cdot 10^{-5} + 0,322 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3})^{0,513-1}}{2(1+0,513)(2+0,513) + 6 \cdot 0,513 \cdot 0,322(2,99 \cdot 10^{-5} + 0,322 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3})^{0,513-1}} \right] = 56,30^\circ$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}/((1+a)(2+a))}}$$

$$c' = \frac{66,83 [(1 + 2 \cdot 0,513)2,99 \cdot 10^{-5} + (1 - 0,513)0,322 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3}](2,99 \cdot 10^{-5} + 0,322 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3})^{0,513-1}}{(1 + 0,513)(2 + 0,513)\sqrt{6 \cdot 0,513 \cdot 0,322(2,99 \cdot 10^{-5} + 0,322 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3})^{0,513-1}/((1 + 0,513)(2 + 0,513))}}$$

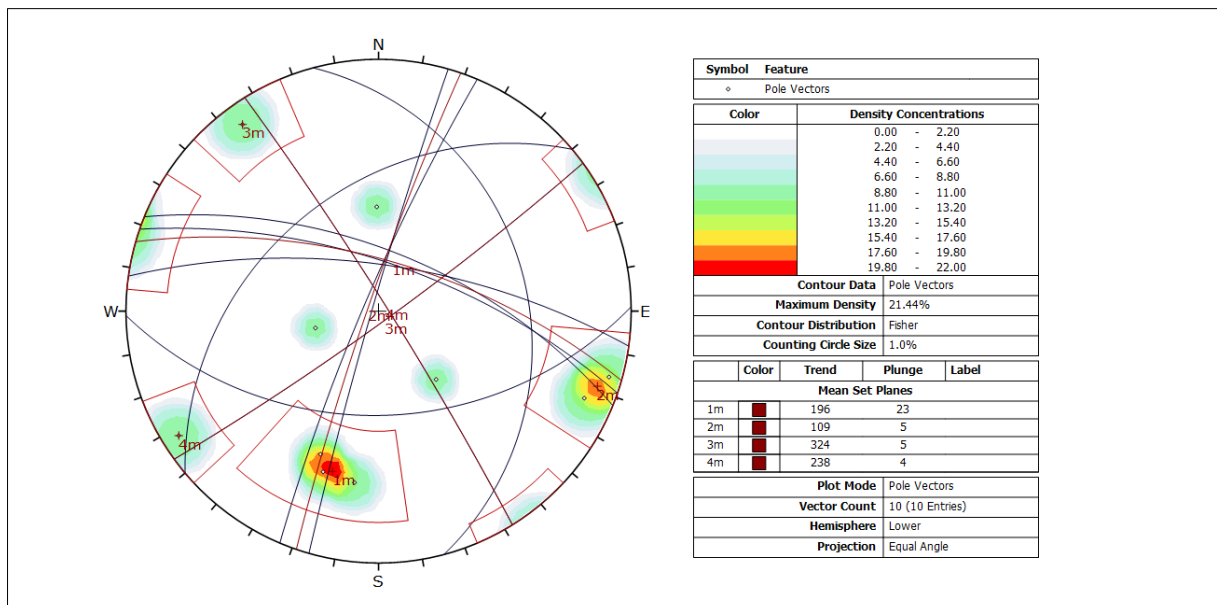
$$c' = 0,065 \text{ MPa}$$

5.2 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS1

A projeção estereográfica das descontinuidades principais presentes na seção TS1 foram realizadas no software Dips (Figura 47). Nessa plotagem tanto os planos e polos das descontinuidades foram exibidos, também foram demarcadas as quatro famílias de descontinuidades com a geração da orientação média para cada família, além disso é possível observar também as descontinuidades aleatórias da seção. A projeção empregada foi de igual ângulo e hemisfério baixo.

Para a análise cinemática-probabilística empregou-se o ângulo de atrito interno, anteriormente cálculo de $59,39^\circ$, direção da face talude de 300° , mergulho do talude de 87° e limite inferior e superior da direção da face do talude de $\pm 20^\circ$. A partir da inserção desses dados no software Dips, o mesmo gerou o círculo de atrito interno, zona crítica e limites superior e inferior em relação a direção da face do talude.

Figura 47 - Projeção estereográfica da seção TS1

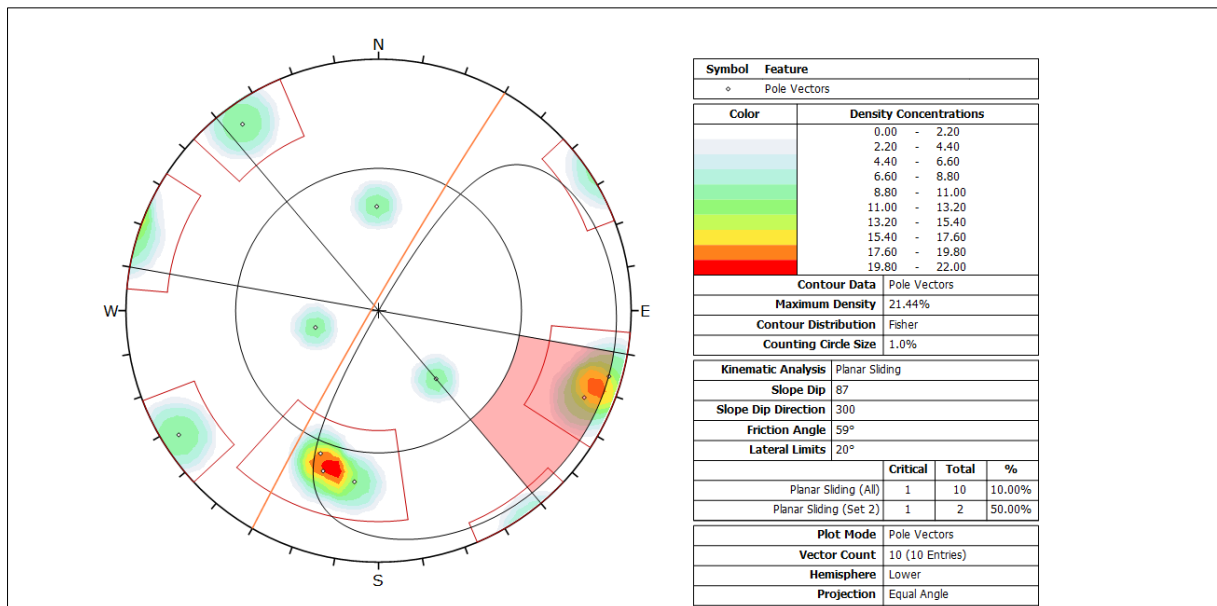


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura planar

Para análise da condição de ruptura planar (Figura 48), apenas uma descontinuidade das 10 plotadas encontra-se em estado crítico segundo a avaliação global, a família 1 nomeada pelo software apresenta uma descontinuidade crítica, sendo a mesma descontinuidade da avaliação global. Essa descontinuidade crítica apresenta altitude de orientação de $83^\circ/293^\circ$, tendo uma alta possibilidade para sofrer esse tipo de ruptura, pois possui inclinação superior ao ângulo de atrito interno e inferior a inclinação do talude, além de mergulhar quase que paralelo a face do talude. A probabilidade de ruptura planar é de 10%.

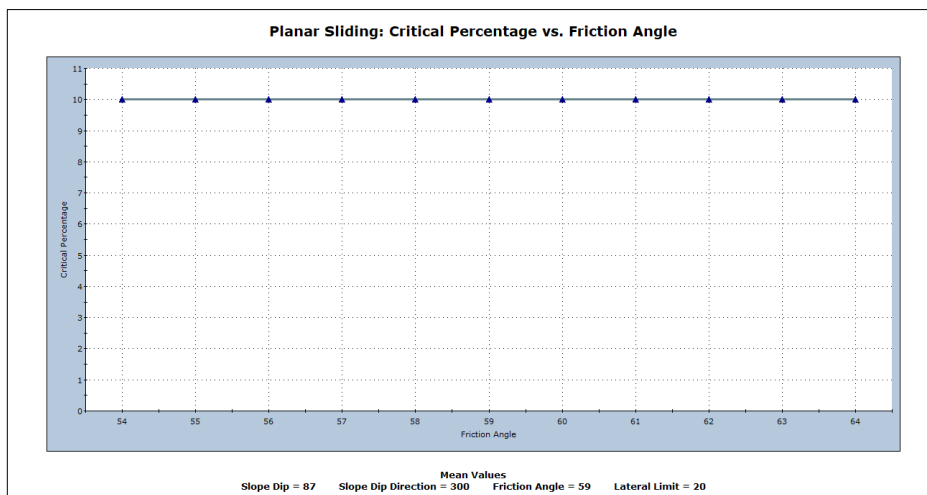
Figura 48 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

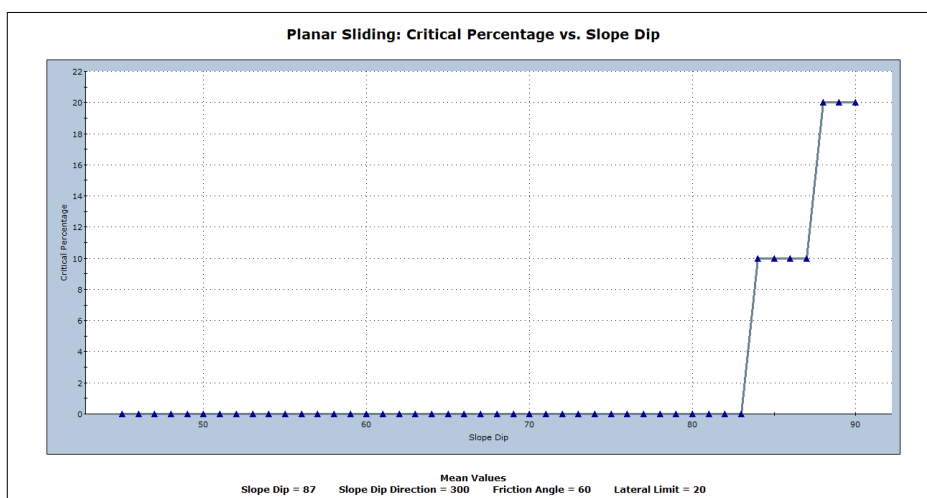
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura planar, foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $59,39^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para esse intervalo, como pode ser visto na Figura 49. Já ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica aumenta para 20% em inclinações superiores a 87° até 90° e será nula para inclinações inferiores a 83° , segundo a Figura 50.

Figura 49 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 50 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar seção na TS1

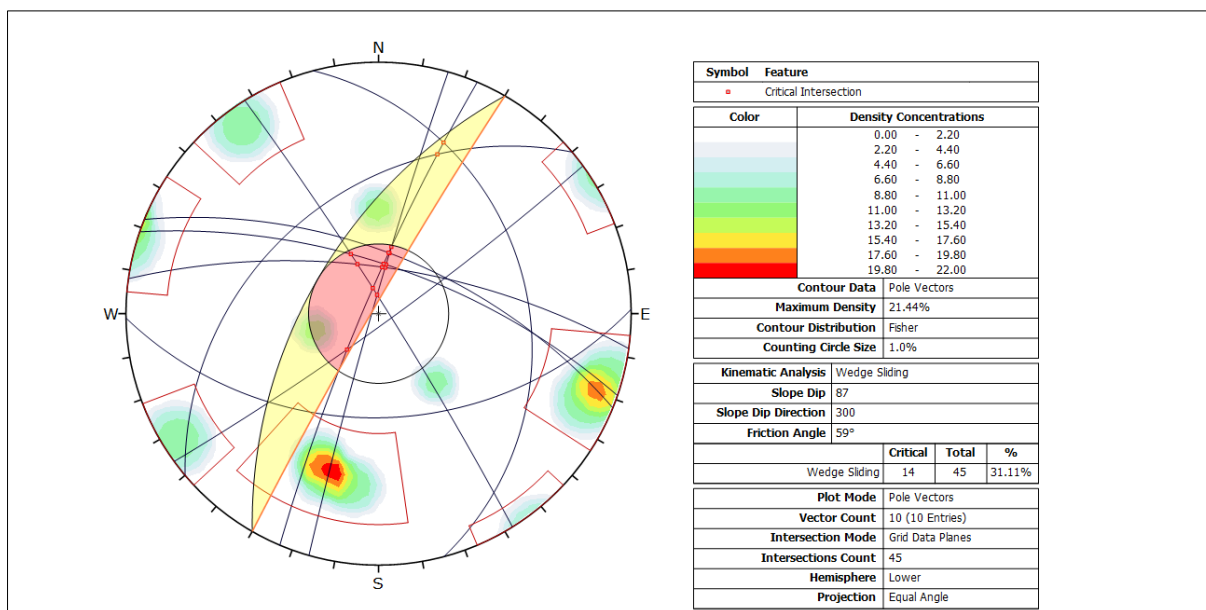


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura em cunha

Para análise da condição de ruptura em cunha (Figura 51), verificou-se a detecção de 14 interseções entre descontinuidades presentes nas zonas críticas, sendo 12 interseções na zona crítica primária e 2 na zona crítica secundária. Das 10 descontinuidades da seção gerou-se 45 interseções globais. As descontinuidades da zona crítica primária apresentam mergulho superior ao ângulo de atrito interno e inferior a inclinação do talude, já as da zona crítica secundária possuem mergulho inferior ao ângulo de atrito interno. A probabilidade de ruptura em cunha é de 31,11%. A Tabela 13 traz as 14 interseções críticas presentes na seção avaliada.

Figura 51 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 14 - Interseções presentes na seção avaliada

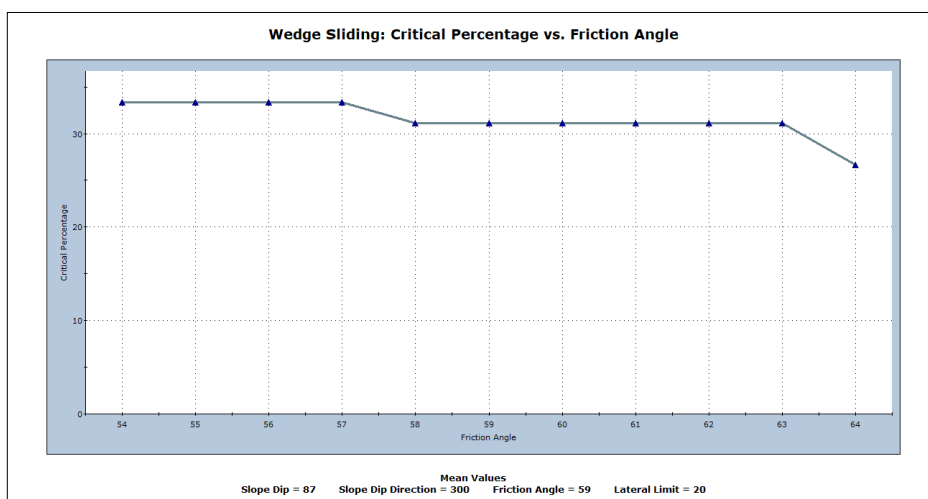
Interseção	A	B
1	83/293	39/320
2	83/293	29/075
3	83/293	85/144
4	83/293	86/058
5	83/293	69/008
6	83/293	68/019
7	83/293	63/022
8	83/293	87/286
9	69/008	87/286
10	68/019	87/286
11	68/019	86/058
12	87/286	68/019
13	87/286	63/022
14	87/286	86/058

Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $59,39^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica diminui para um valor maior que 63° e aumenta para um valor de 58° sendo que, esse aumento e diminuição interfere muito pouco no valor da porcentagem crítica, como pode ser visto na Figura 52. Já ao

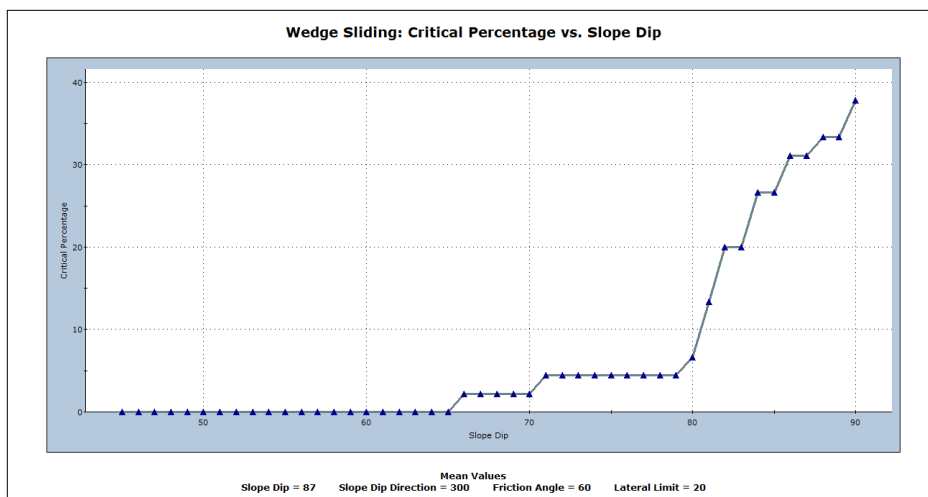
variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica aumenta quase que progressivamente para até 37% em inclinações superiores a 65° até 90° e será nula para inclinações inferiores a 65°, segundo a Figura 53.

Figura 52 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 53 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1



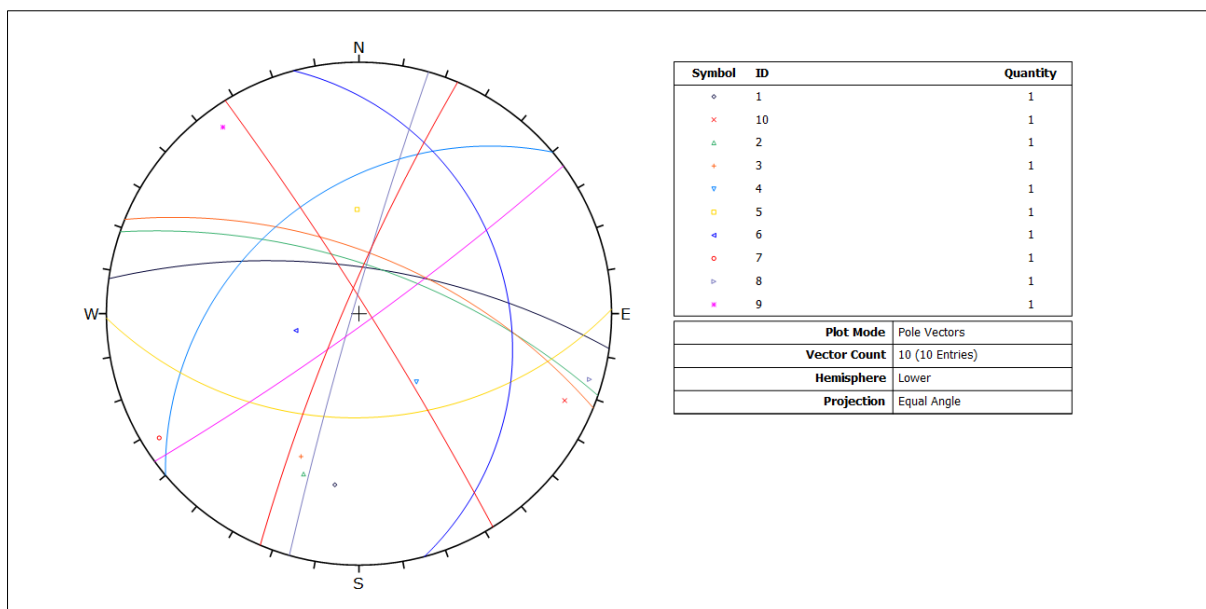
Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura circular

A avaliação da orientação das descontinuidades da seção analisada, indica um padrão de orientação muito variado das descontinuidades, possuindo uma condição de moderado padrão de dispersão, mesmo assim, possui uma chance muito mínima de sofrer

ruptura circular global, mas deve ser feita uma análise por equilíbrio e limite para avaliação de uma possível superfície potencial de ruptura. A Figura 54 traz a projeção dos planos e polos das 10 discontinuidades medidas na seção.

Figura 54 - Projeção dos planos e polos das discontinuidades na seção TS1



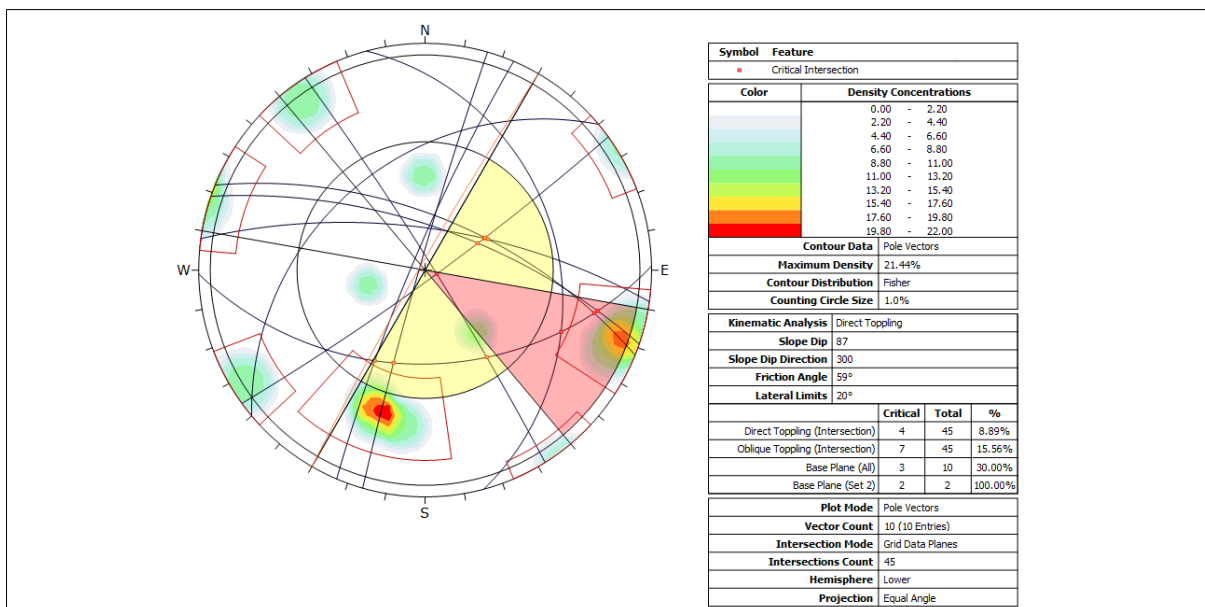
Fonte: Autor, 2022.

▪ Ruptura por tombamento

Para análise da condição de ruptura por tombamento é avaliado para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo (Figura 55) e para tombamento por flexão (Figura 56). Na condição de tombamento do bloco direto, 4 interseções estão presentes na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 8,89%. Já para a condição de tombamento do bloco oblíquo, 7 interseções estão presentes na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 15,56%.

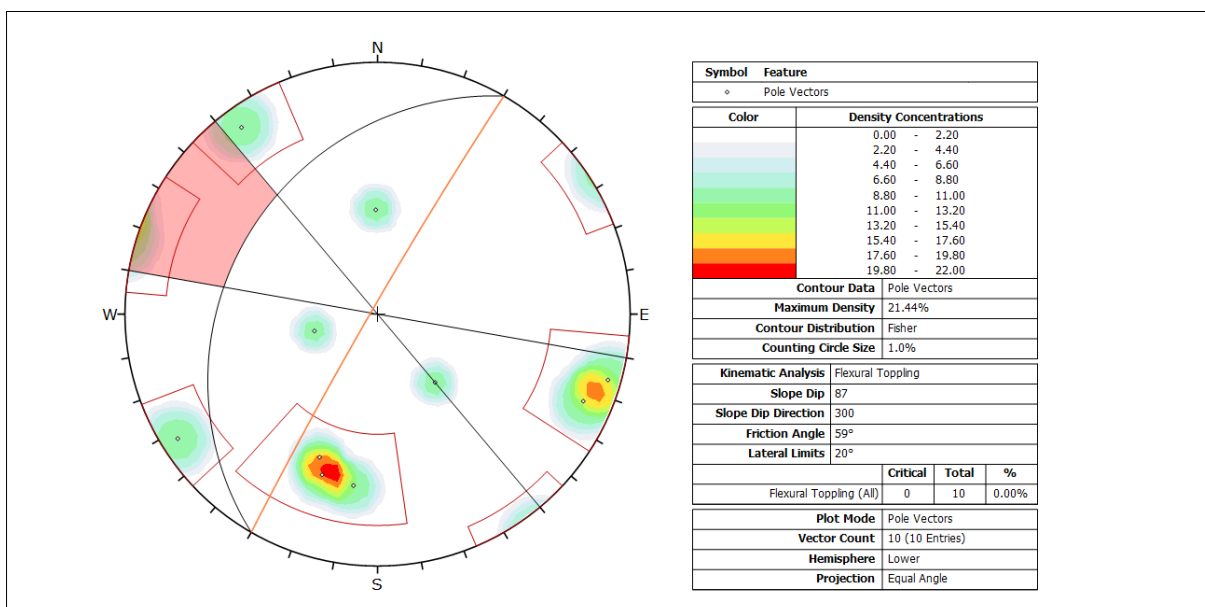
Para a condição de tombamento por flexão, nenhuma discontinuidade está presente na zona crítica, possuindo uma probabilidade nula para esse tipo de ruptura. As inclinações médias dos blocos críticos foram de 29°, 45°, 66° e 85°.

Figura 55 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 56 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1

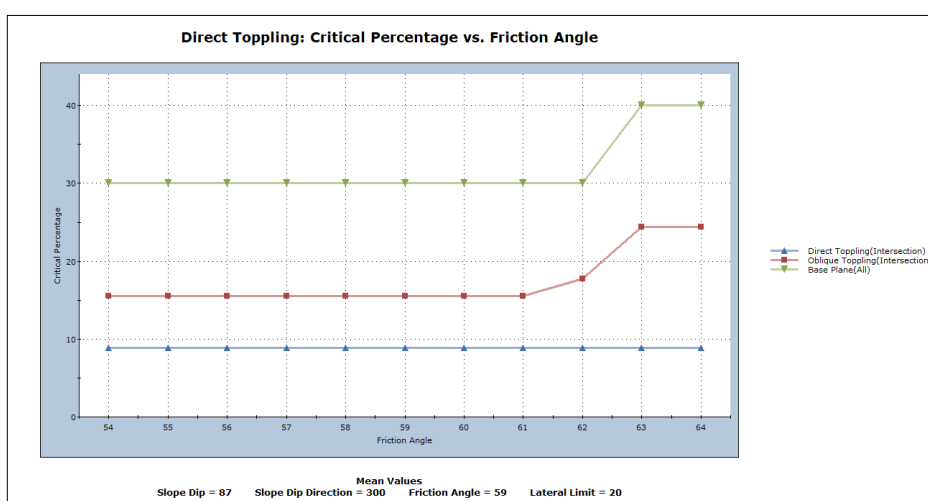


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo e para tombamento do bloco por flexão, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que

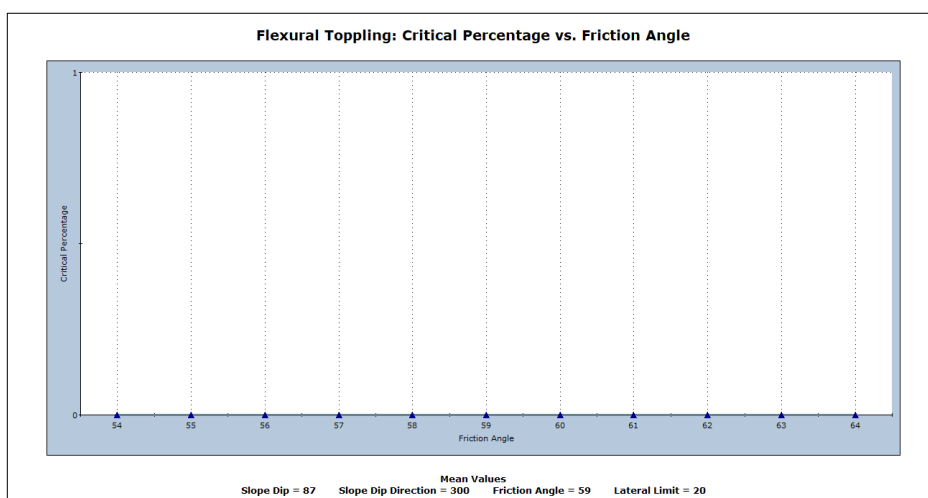
corresponde a $59,39^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para valores menores que 59° tanto para tombamento do bloco direto e oblíquo, para valores superiores a 59° a porcentagem crítica aumenta de 15,56% para até 25% na condição de tombamento do bloco oblíquo e permanece o mesmo para a condição de tombamento do bloco direto, como é possível observar na Figura 57. Já a variabilidade no valor do ângulo de atrito interno, não influencia para o surgimento de uma descontinuidade crítica para a condição de tombamento do bloco por flexão, segundo a Figura 58, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 57 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

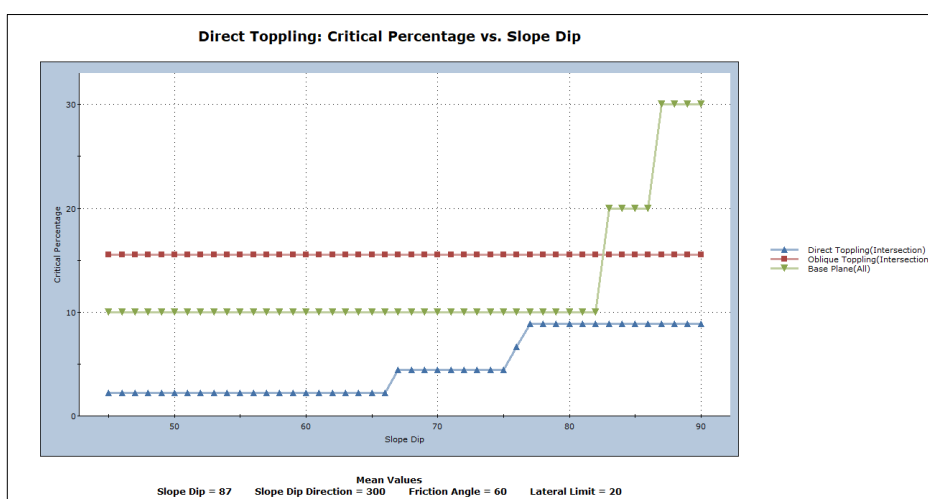
Figura 58 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

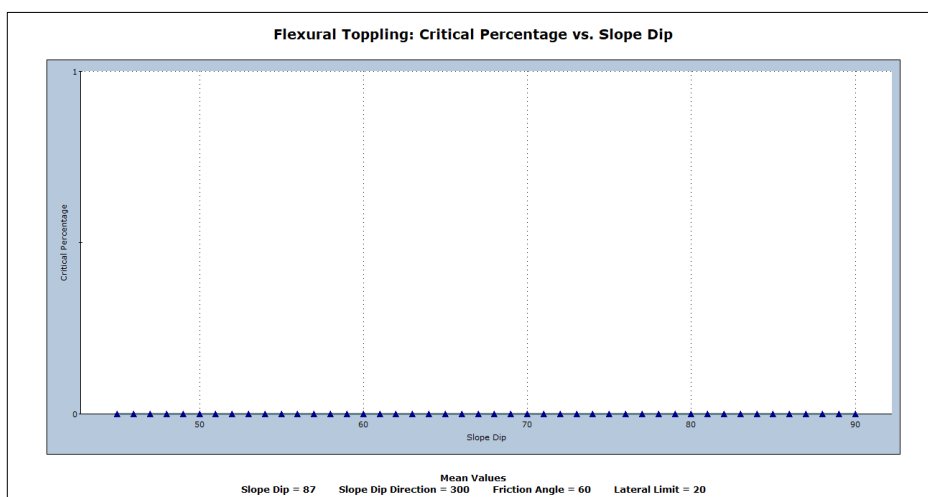
Ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica para a condição de tombamento do bloco oblíquo permanece a mesma para esse intervalo, já para tombamento do bloco direto a porcentagem crítica permanece a mesma para valores de inclinação superiores a 87° até 90° e diminui para valores próximos de zero em inclinações inferiores a 77° , como podem ser vistos na Figura 59. Para a condição de tombamento do bloco por flexão, a variação da inclinação entre 45° e 90° não influencia para o surgimento de uma descontinuidade em situação crítica, segundo a Figura 60, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 59 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 60 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

5.3 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS1

A análise determinística para a seção TS1 deu-se a partir das descontinuidades críticas identificadas na análise cinemática-probabilística, nessa análise foi detectado condições para ruptura planar, em cunha e tombamento do bloco direto e oblíquo, além de ter sido feito a recomendação para uma avaliação para a condição de ruptura circular.

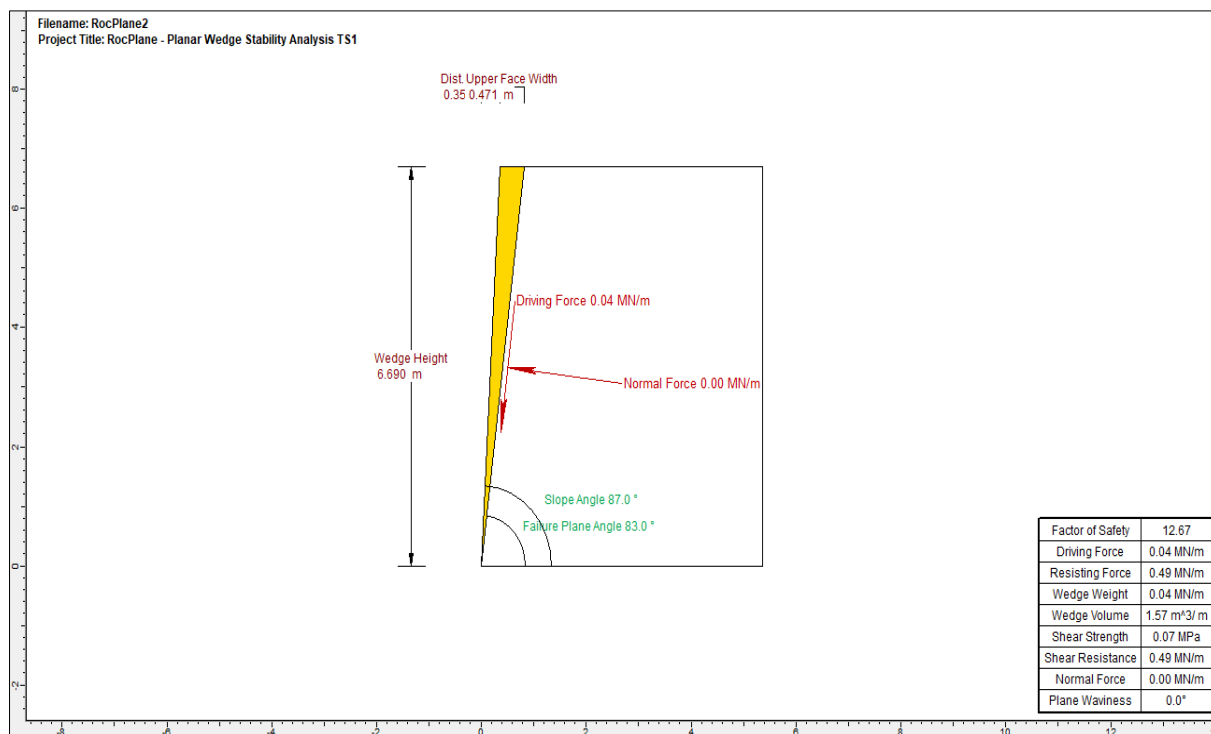
Os parâmetros geométricos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: altura do talude de 6,69 m, comprimento do topo do talude de 5 m, inclinação da face do talude 87° e inclinação do topo do talude de 0° . Já os parâmetros geomecânicos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: peso específico da rocha de $0,0246 \text{ MN/m}^3$ e peso específico da água igual a $0,01 \text{ MN/m}^3$.

Para o critério de ruptura, os parâmetros variaram dependendo do tipo de análise e limitações dos softwares em relação ao critério de ruptura. Na análise por ruptura planar e circular, os softwares empregados para essas duas análises são compatíveis com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: resistência à compressão uniaxial de 88,25 Mpa; constante m_b de 0,551; constante s de 0,0001 e constante a de 0,508. Já para análise de ruptura em cunha e tombamento, os softwares empregados para essas duas análises não são compatíveis com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, mas eles são compatíveis com o critério de Mohr-Coulomb, podendo empregar os parâmetros geomecânicos desse critério obtidos do critério Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: ângulo de atrito interno de $59,39^\circ$ e coesão do material de 0,129 Mpa.

- Ruptura planar

A descontinuidade crítica para a condição de ruptura planar possui altitude de orientação de $83^\circ/293^\circ$. O resultado dessa análise resultou em um fator de segurança de 12,67 para uma força mobilizadora de 0,0384 MN/m e resistiva de 0,4871 MN/m, indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície da descontinuidade é 12,67 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento de massa na superfície da descontinuidade, sendo assim, a descontinuidade com tendência à ruptura planar encontra-se bastante estável. A Figura 61 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, da descontinuidade e uma tabela com valores importantes arredondados.

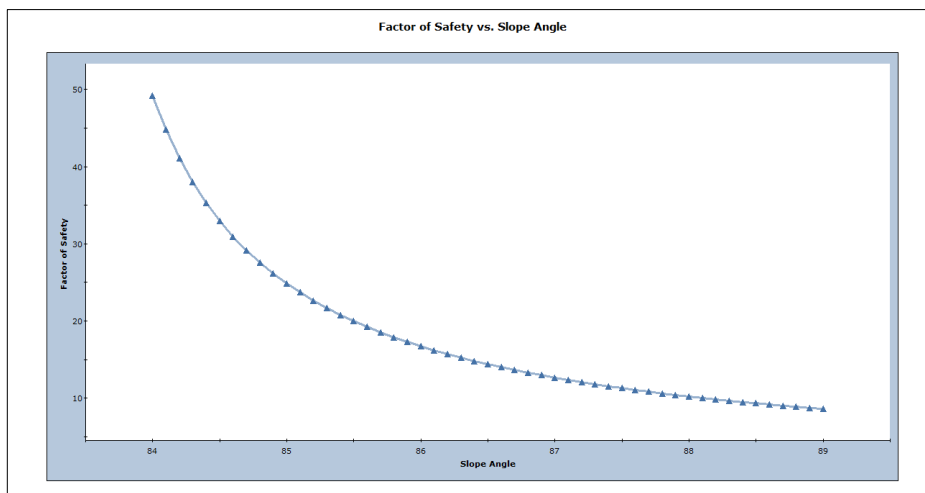
Figura 61 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura planar na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

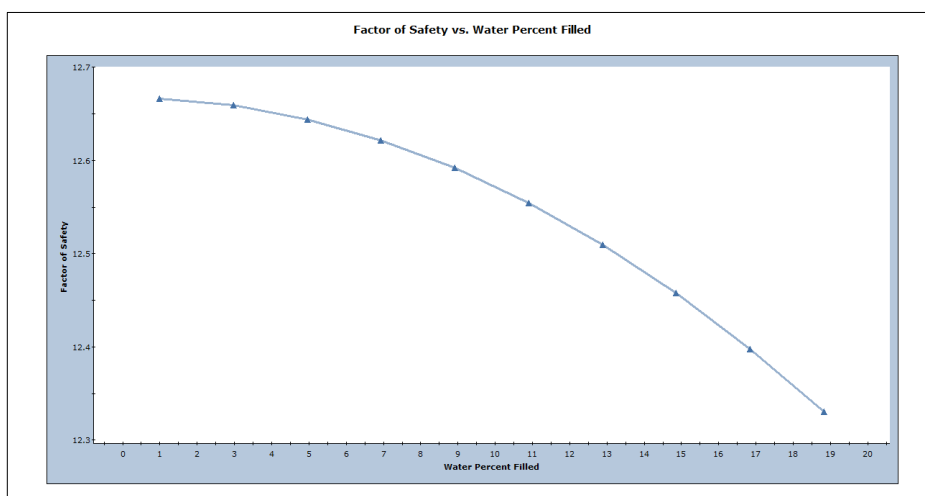
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura planar, foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação no ângulo do talude e da porcentagem de saturação da região da descontinuidade do talude na presença de água. Tendo como resultado que ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 84° até 90°, pois abaixo de 84° o plano de ruptura é eliminado, mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 10, segundo a Figura 62. Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% o software retorna para apenas um intervalo de 0% até 19%, pois acima de 19% a região crítica perde a resistência ao cisalhamento e o fator de segurança cai para 0. É possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação na região da descontinuidade o fator de segurança diminui, segundo a Figura 63.

Figura 62 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 63 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

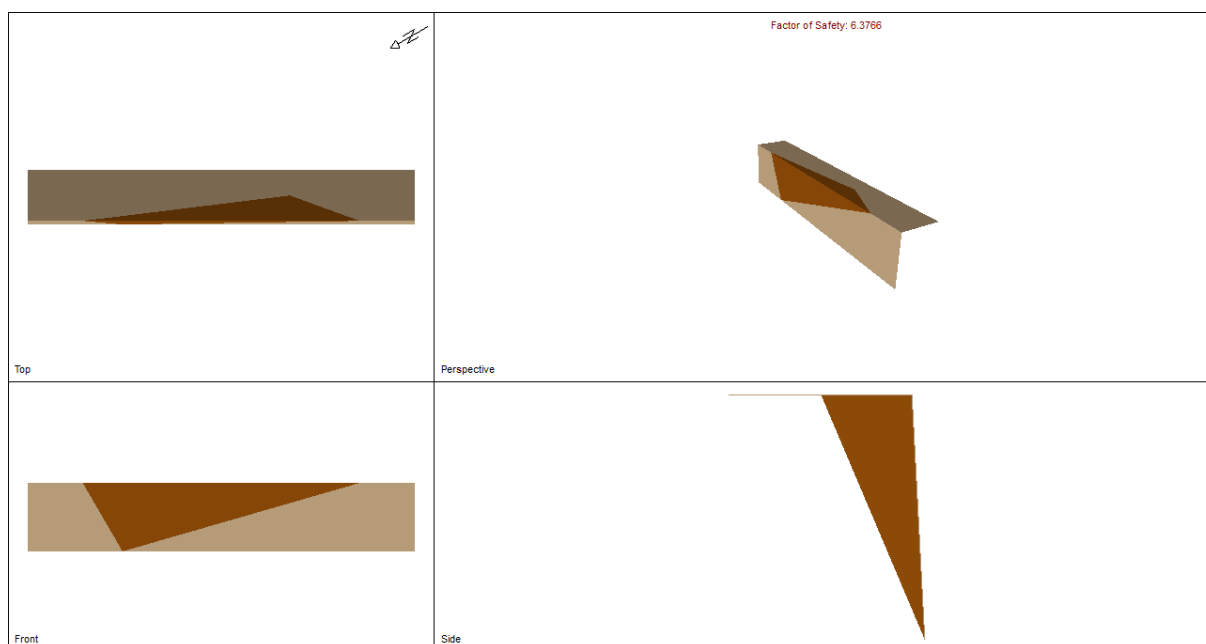
- Ruptura em cunha

Para a condição de ruptura em cunha foi detectado 14 interseções entre descontinuidades críticas na análise cinemática-probabilística, sendo a altitude de orientação entre a interseção que retornou o menor fator de segurança a de $83^{\circ}/293^{\circ}$ sofrendo interseção com a de $39^{\circ}/320^{\circ}$.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 6,3766 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície formada entre as descontinuidades é 6,3766 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento de massa nessa

superfície de interseção. Sendo assim, a interseção de menor fator de segurança com tendência à ruptura em cunha encontra-se bastante estável, com as demais possuindo um fator de segurança bem maior e, portanto, também estáveis. A Figura 64 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise e a geometria da interseção entre as descontinuidades em diferentes perspectivas.

Figura 64 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS1

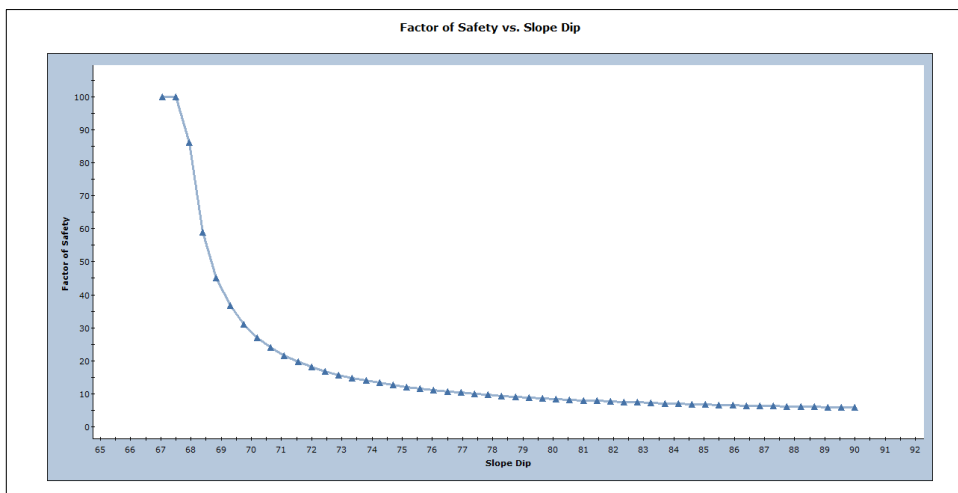


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, foram também avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação no ângulo do talude e da porcentagem de saturação da região da interseção entre as descontinuidades do talude na presença de água. Tendo como resultado que, ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° , o software retorna apenas um intervalo entre 64° até 90° , pois abaixo de 64° o fator de segurança é maior que 100. Mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 6 e com uma redução da inclinação haveria um aumento no fator de segurança, segundo a Figura 65.

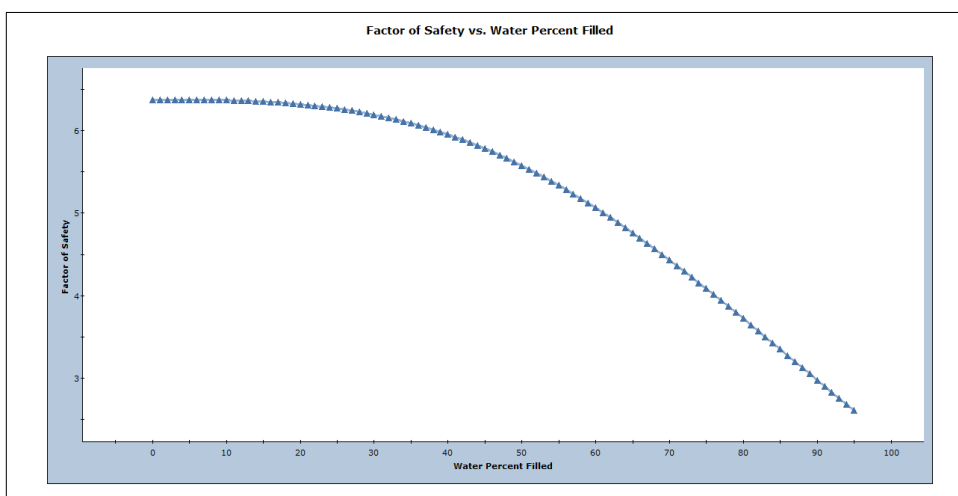
Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação na região da interseção entre as descontinuidades o fator de segurança diminui, sendo que a região crítica perde a resistência ao cisalhamento em uma saturação de 95% e o fator de segurança cai para 0 acima dessa porcentagem crítica de saturação, segundo a Figura 66.

Figura 65 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 66 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

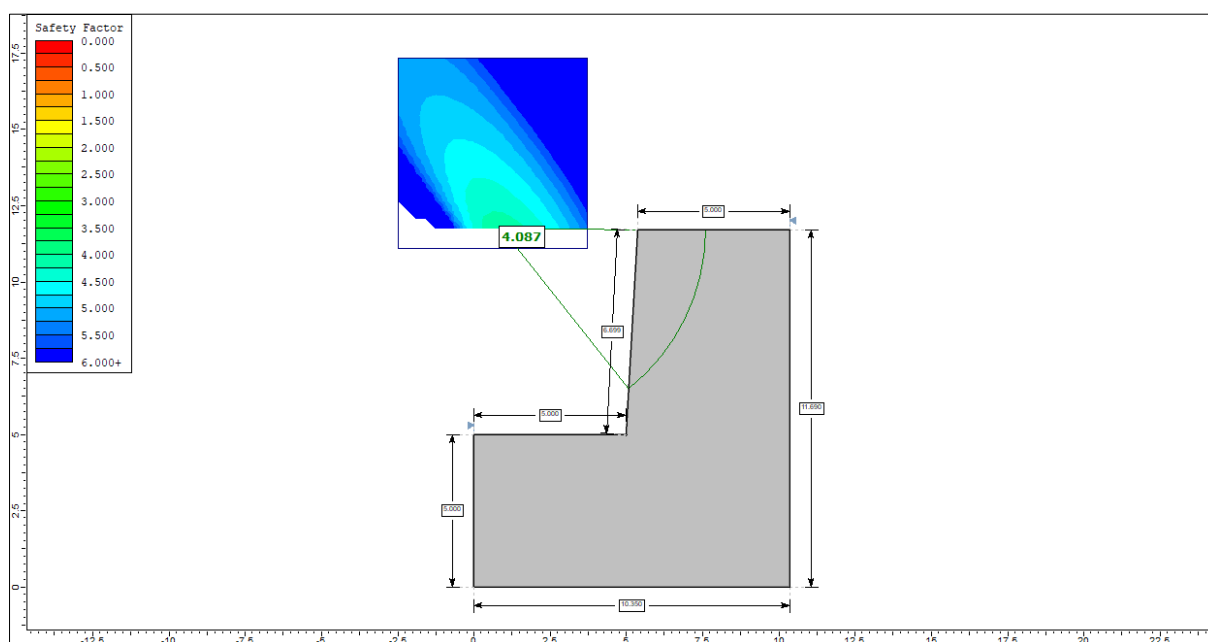
- Ruptura circular

Na análise determinística para a condição de ruptura circular o método empregado foi o de Bishop Simplificado que emprega metodologias de equilíbrio e limite, sendo adotado uma geometria de 5 m de altura por 10,35 m de comprimento, com propriedades geomecânicas da rocha de fundação igual as propriedades do talude, como pode ser visto em campo, com uma distância do pé do talude até a crista da fundação de 5 m.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 4,087 sendo esse fator correspondente a superfície potencial de ruptura que retornou o menor fator de toda a varredura

feita na geometria empregada para avaliação do talude. O resultado obtido indica que a força de cisalhamento resistiva para essa superfície potencial é 4,087 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora atuante nessa superfície. A Figura 67 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, localização da superfície potencial de ruptura e uma escala para o fator de segurança.

Figura 67 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS1



Fonte: Autor, 2022.

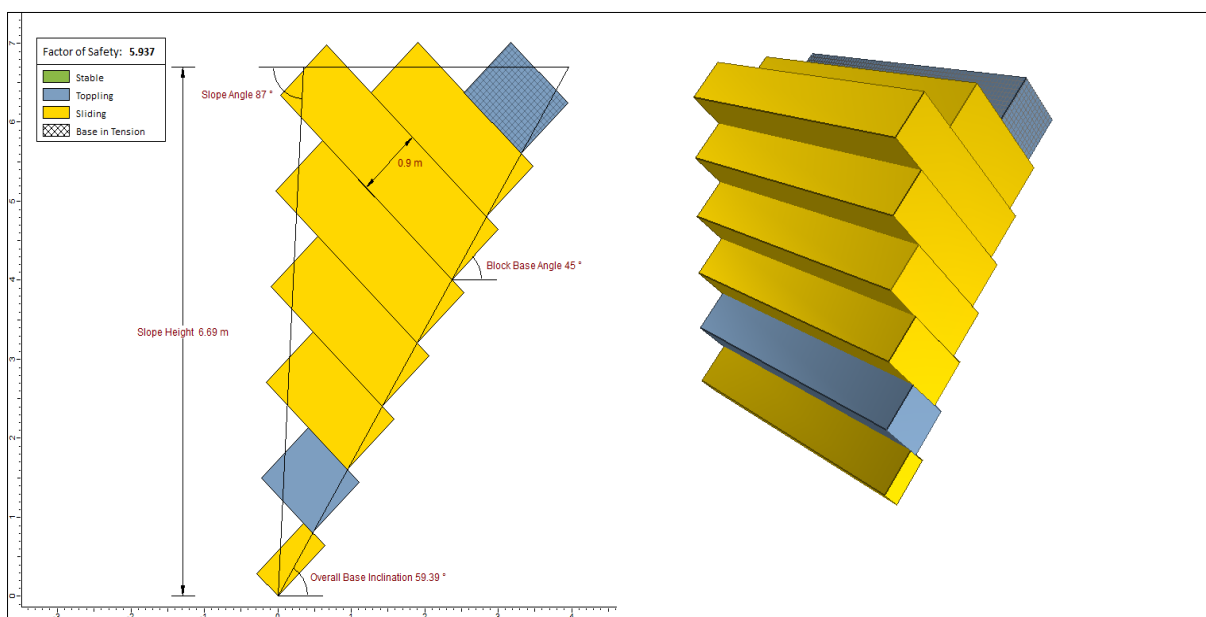
- Ruptura por tombamento

Para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo foi detectado na análise cinemática-probabilística 4 inclinações médias dos blocos críticos sendo elas 29°, 45°, 66° e 85°, tendo as discontinuidades presentes no talude espaçamento de 2,50 cm; 4 cm; 6 cm e 90 cm. A inclinação basal adotada para análise teve com valor considerado o do ângulo de atrito interno que é 59,39°.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 5,937 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície basal dos blocos é 5,937 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento e tombamento do bloco, sendo assim, a combinação que resultou no menor fator de segurança foi a com espaçamento de 90 cm e inclinação do bloco de 45°, possuindo nenhum bloco estável, uma base tombável e a maioria dos blocos deslizáveis, com as demais combinações possuindo um fator de segurança bem maior e características semelhantes dos blocos. A Figura 68 demonstra o resultado do fator

de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, das discontinuidades, perspectiva dos blocos e uma tabela com a classificação e legenda das condições para cada bloco.

Figura 68 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1

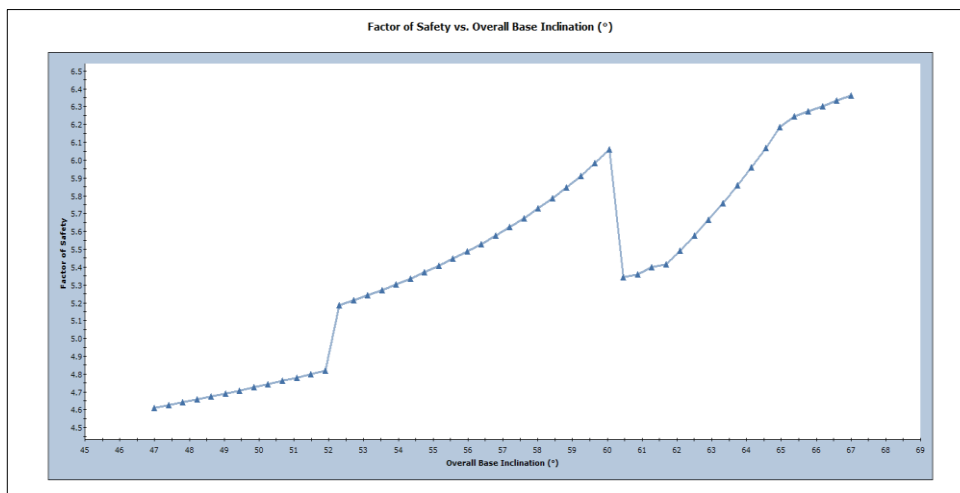


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo, foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação na inclinação basal, no ângulo do talude e da porcentagem de saturação do talude. Tendo como resultado que ao variar a inclinação basal entre 47° a 67° o fator de segurança vai aumentando à medida que se aumenta essa inclinação, alcançando um fator de segurança máximo para a inclinação de 67° de 6,4 e um fator de segurança mínimo para a inclinação de 47° de 4,6 como pode ser visto na Figura 69.

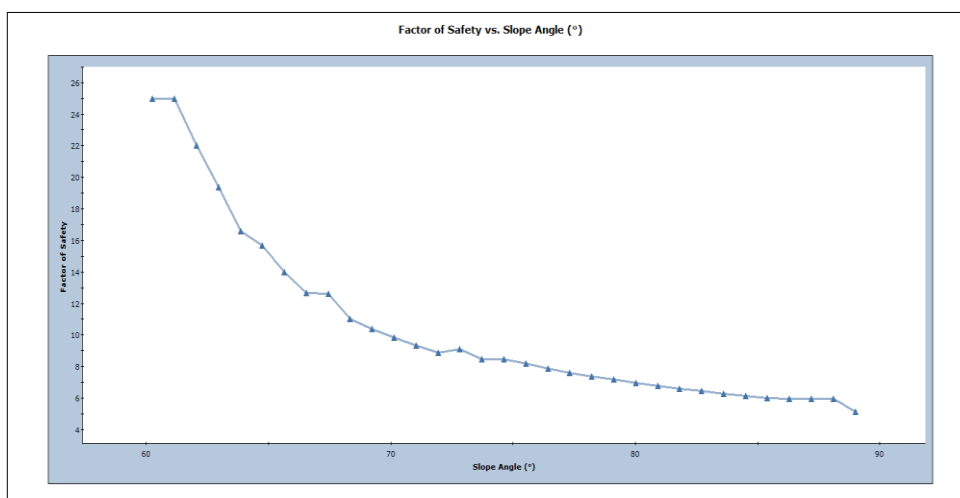
Para a variação da inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 60° até 90° , pois abaixo de 60° a condição de ruptura por tombamento é eliminada, mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 5 e com uma redução da inclinação há um aumento no fator de segurança, segundo Figura 70. Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação no talude o fator de segurança diminui, sendo que a região crítica não perde a resistência ao cisalhamento nem com uma saturação de 100%, segundo a Figura 71.

Figura 69 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1



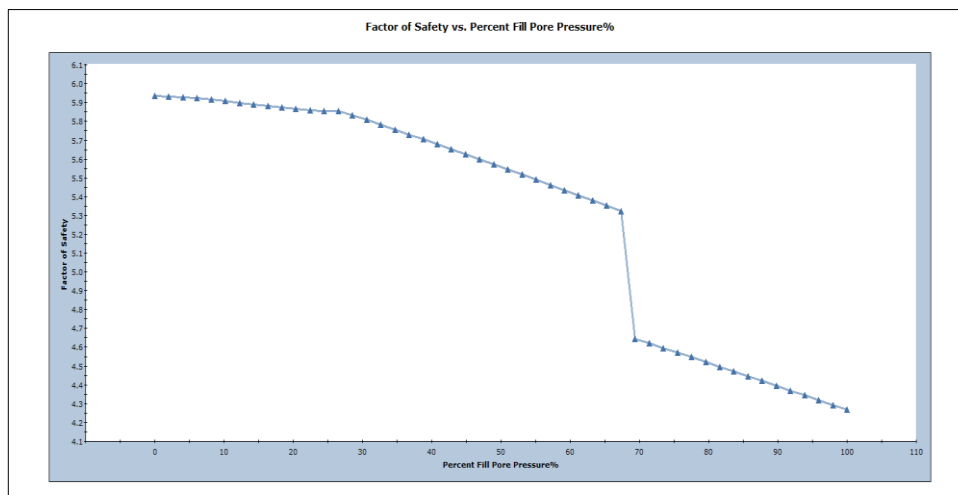
Fonte: Autor, 2022.

Figura 70 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo seção na TS1



Fonte: Autor, 2022.

Figura 71 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS1



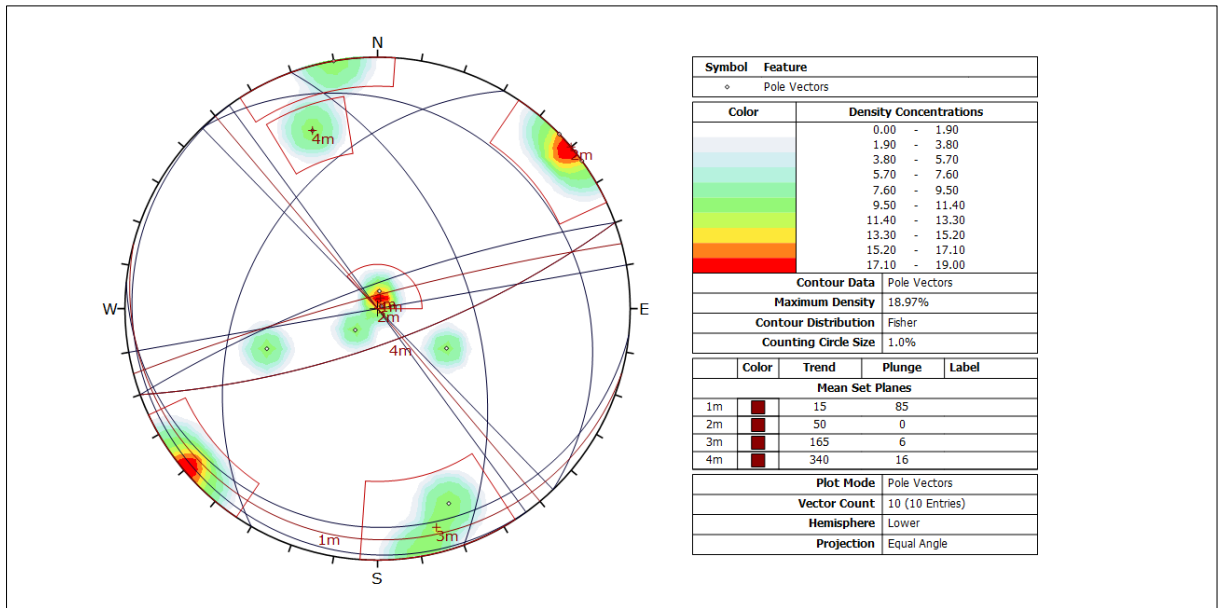
Fonte: Autor, 2022.

5.4 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS2

A projeção estereográfica das descontinuidades principais presentes na seção TS2 foram também realizadas no software Dips (Figura 72). Nessa plotagem tanto os planos e polos das descontinuidades foram exibidos, também foram demarcadas as quatro famílias de descontinuidades com a geração da orientação média para cada família, além disso é possível observar também as descontinuidades aleatórias da seção. A projeção empregada foi de igual ângulo e hemisfério baixo.

Para a análise cinemática-probabilística empregou-se o ângulo de atrito interno, anteriormente cálculo de $61,07^\circ$, direção da face talude de 316° , mergulho do talude de 81° e limite inferior e superior da direção da face do talude de $\pm 20^\circ$. A partir da inserção desses dados no software Dips, o mesmo gera o círculo de atrito interno, zona crítica e limites superior e inferior em relação a direção da face do talude.

Figura 72 - Projeção estereográfica da seção TS2

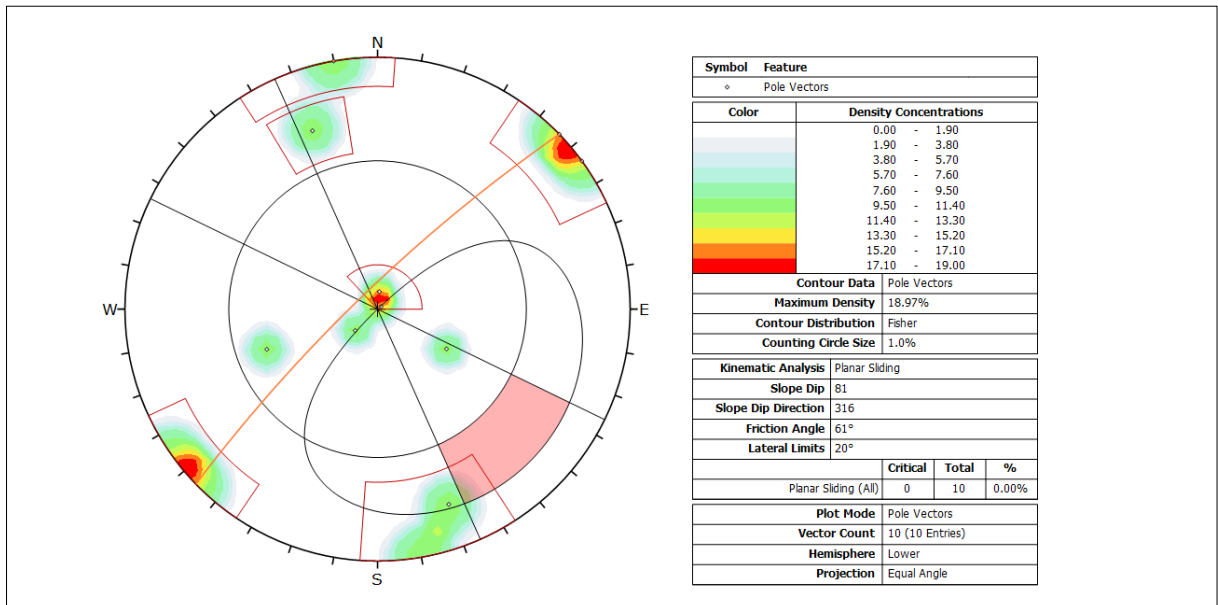


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura planar

Para análise da condição de ruptura planar (Figura 73), nenhuma descontinuidade encontra-se em estado crítico para sofrer ruptura, possuindo uma probabilidade nula para esse tipo de ruptura.

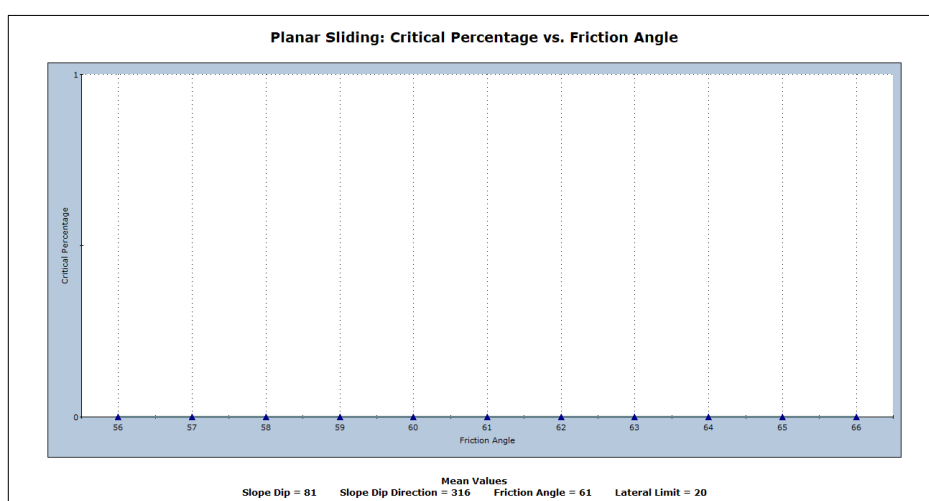
Figura 73- Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

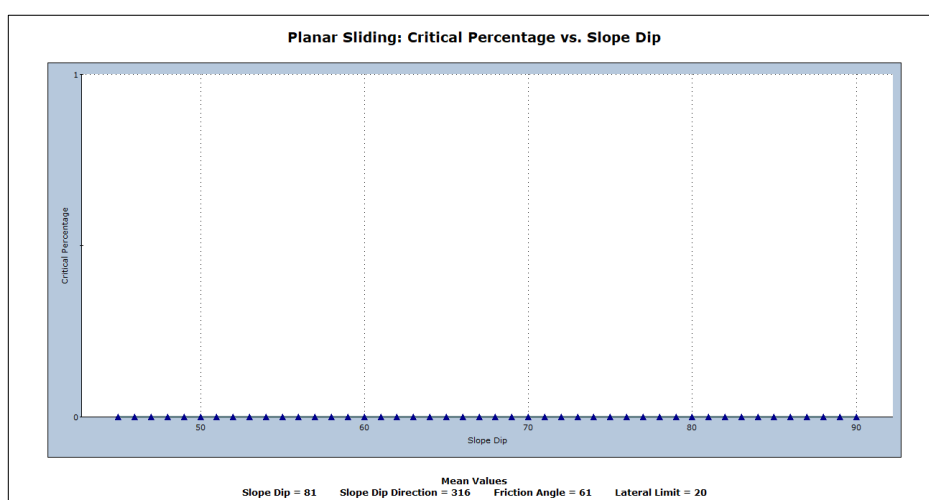
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura planar, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $61,07^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece nula para esse intervalo de variabilidade do valor, como pode ser visto na Figura 74. Já ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° não influencia para o surgimento de uma descontinuidade em situação crítica, segundo a Figura 75, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 74 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 75 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS2

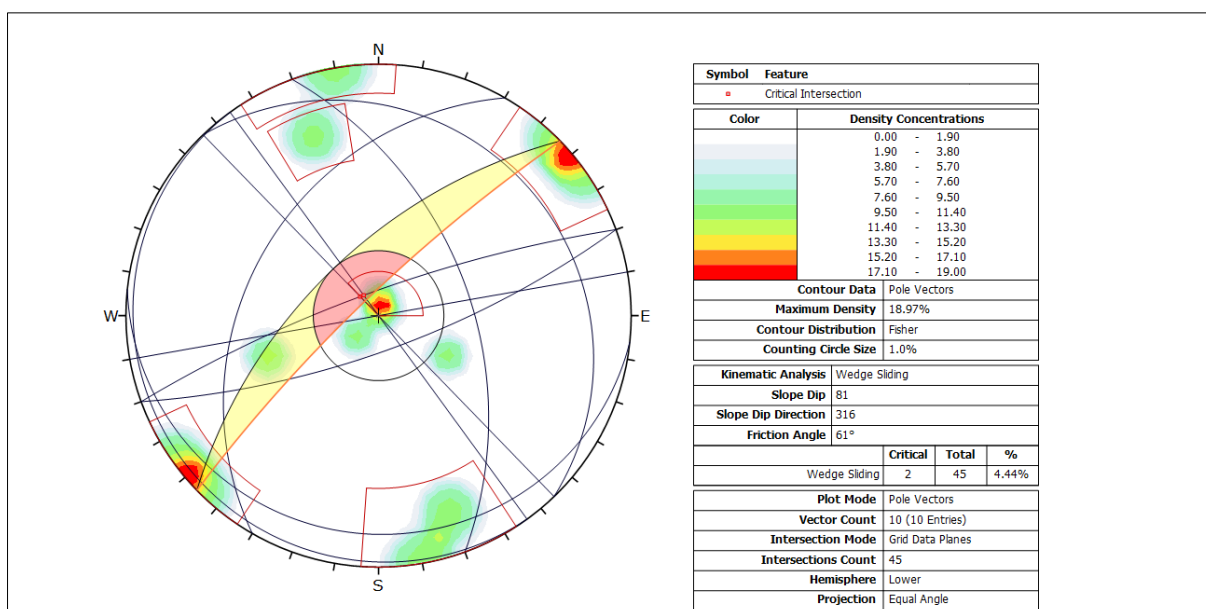


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura em cunha

Para análise da condição de ruptura em cunha (Figura 76), verificou-se a detecção de 2 interseções entre descontinuidades presentes nas zonas críticas, sendo as duas interseções na zona crítica primária e nenhuma na zona crítica secundária. Das 10 descontinuidades da seção gerou-se 45 interseções globais, sendo as críticas com altitude de $79^\circ/340^\circ$ sofrendo interseção com a $90^\circ/226^\circ$ e $90^\circ/234^\circ$. As descontinuidades da zona crítica primária apresentam mergulho superior ao ângulo de atrito interno e duas com mergulho superior à inclinação do talude. A probabilidade de ruptura em cunha é de 4,44%.

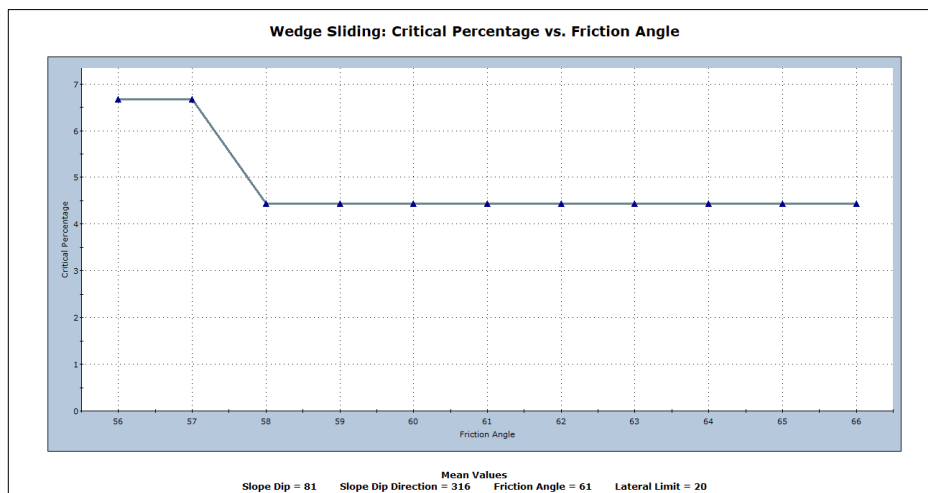
Figura 76 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

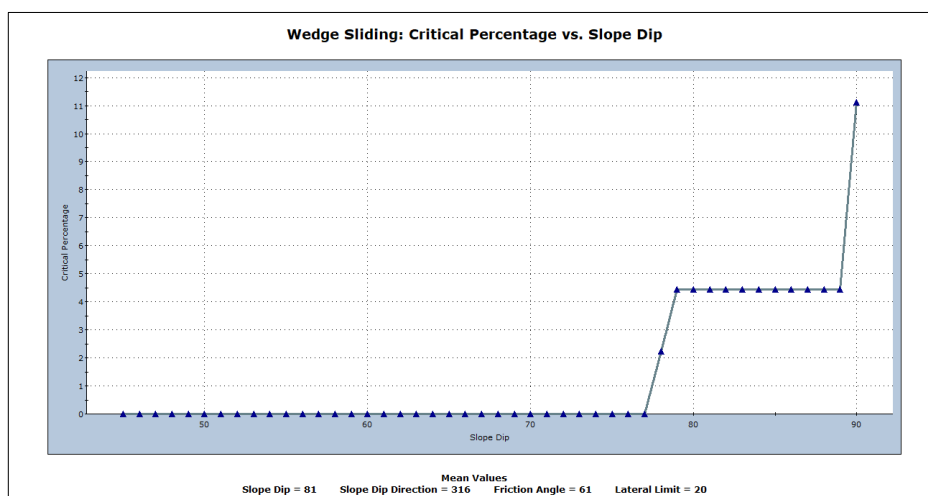
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $61,07^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para um valor maior que 61° e aumenta para um valor menor que 58° sendo que, esse aumento interfere muito pouco no valor da porcentagem crítica, como pode ser visto na Figura 77. Já ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° , a porcentagem crítica aumenta de forma não progressiva para até 11% em inclinações superiores a 77° até 90° e será nula para inclinações inferiores a 77° , segundo a Figura 78.

Figura 77 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 78 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2

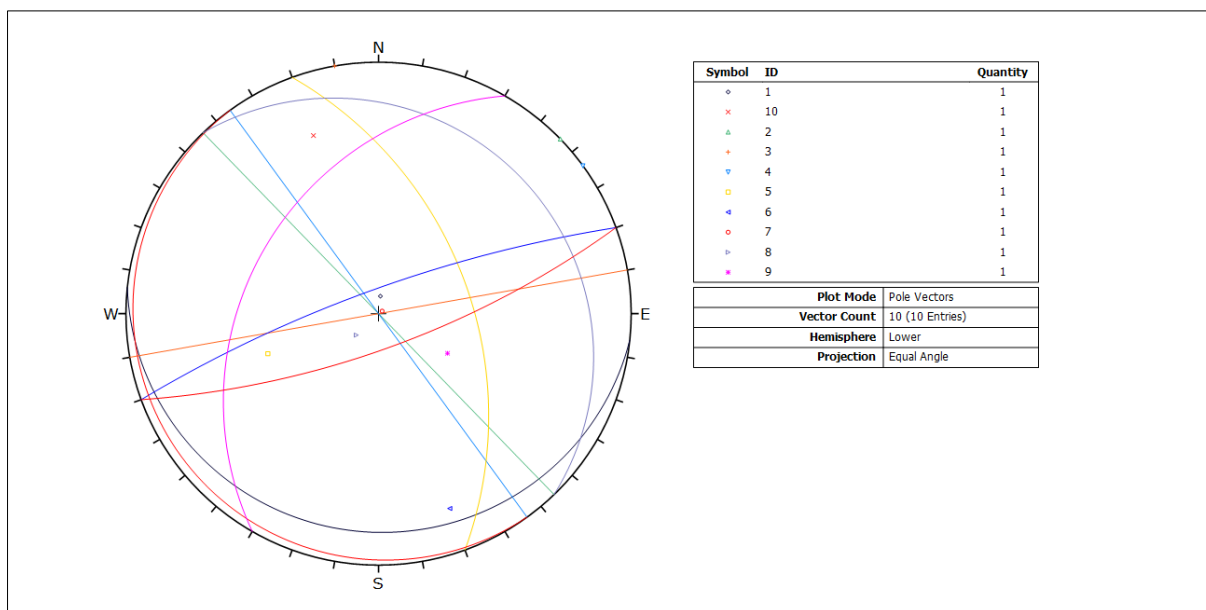


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura circular

A avaliação da orientação das discontinuidades da seção analisada, indica um padrão de orientação não muito variado das discontinuidades, possuindo uma condição de baixo padrão de dispersão, tendo também uma chance muito mínima de sofrer ruptura circular global, devendo também ser feito uma análise por equilíbrio e limite para avaliação de uma possível superfície potencial de ruptura. A Figura 79 traz a projeção dos planos e polos das 10 discontinuidades medidas na seção.

Figura 79 - Projeção dos planos das discontinuidades na seção TS2



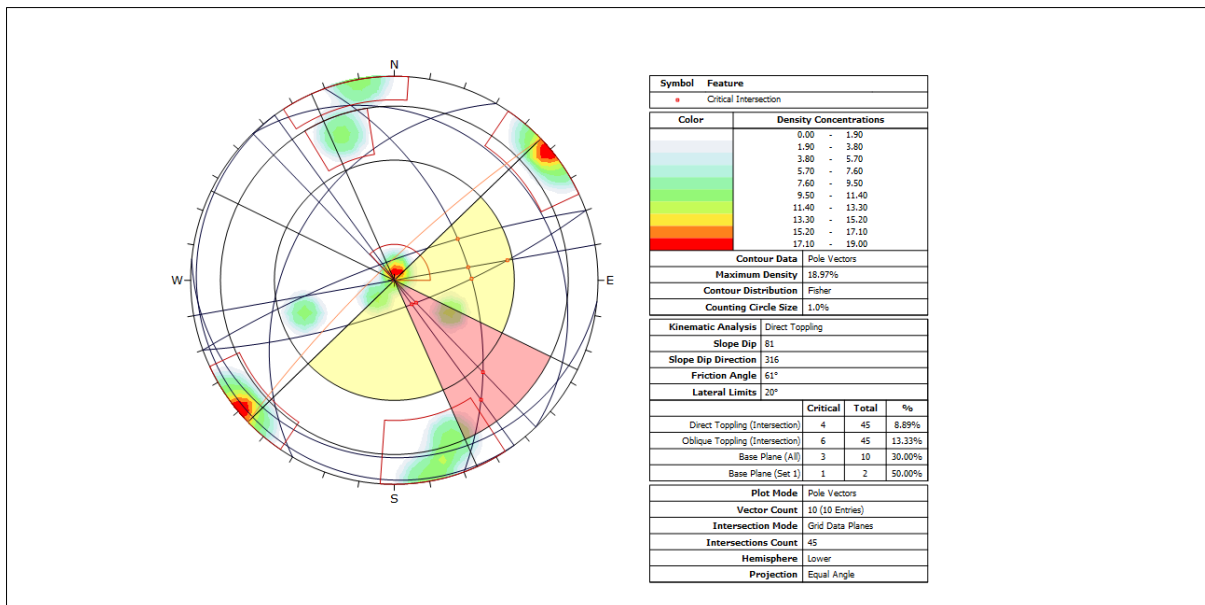
Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura por tombamento

Para análise da condição de ruptura por tombamento foi avaliado também para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo (Figura 80) e para tombamento por flexão (Figura 81). Na condição de tombamento do bloco direto, 4 interseções estão presentes na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 8,89%. Já para a condição de tombamento do bloco oblíquo, 6 interseções estão presentes na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 13,33%.

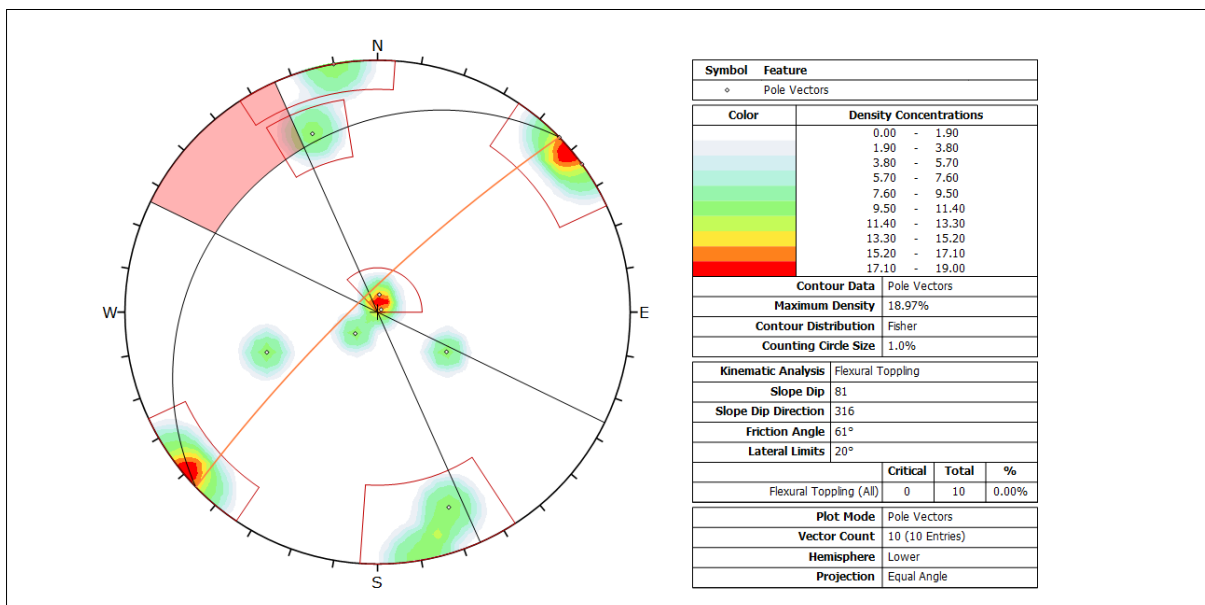
Para a condição de tombamento por flexão, nenhuma descontinuidade está presente na zona crítica, possuindo uma probabilidade nula para esse tipo de ruptura. As inclinações médias dos blocos críticos foram de 50°, 76° e 90°.

Figura 80 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 81 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2

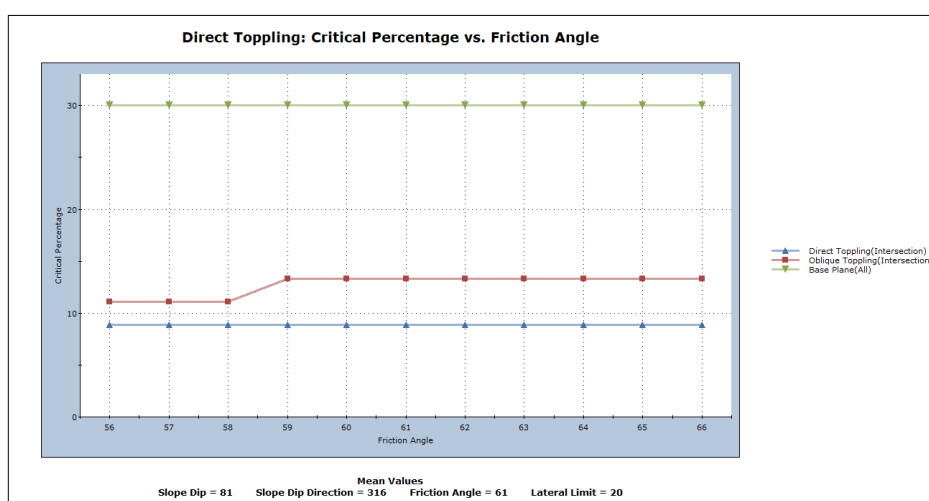


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo e para tombamento do bloco por flexão, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que

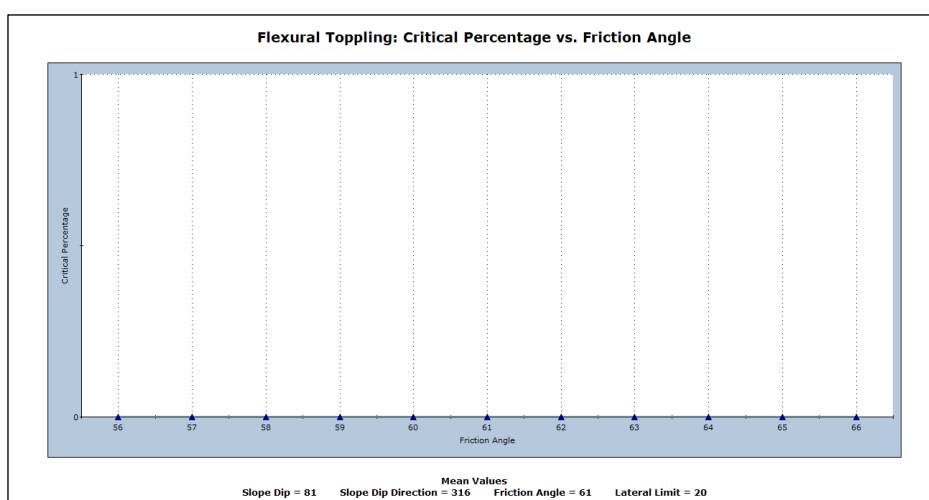
corresponde a $61,07^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para valores maiores que 61° tanto para tombamento do bloco direto e oblíquo, para valores menores que 61° a porcentagem crítica diminui muito pouco na condição de tombamento do bloco oblíquo e permanece o mesmo para a condição de tombamento do bloco direto, como é possível observar na Figura 82. Já a variabilidade no valor do ângulo de atrito interno, não influencia para o surgimento de uma descontinuidade crítica para a condição de tombamento do bloco por flexão, segundo a Figura 83, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 82 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

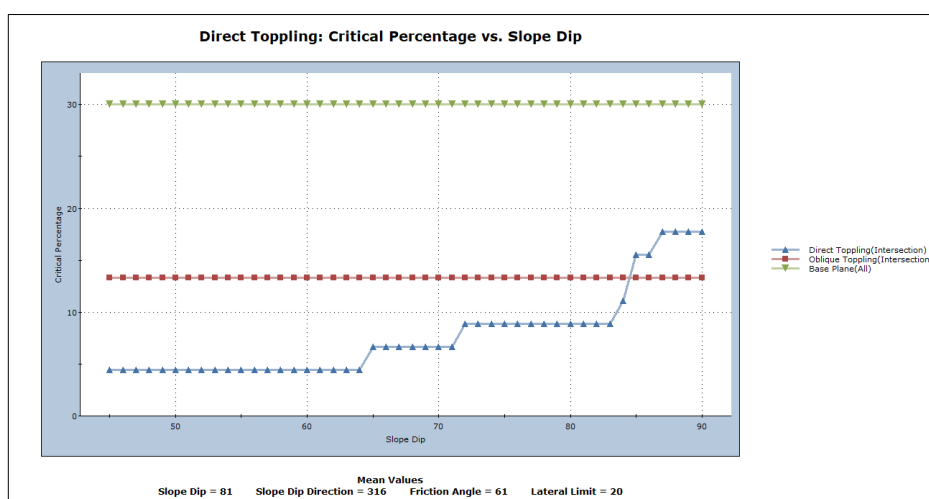
Figura 83 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

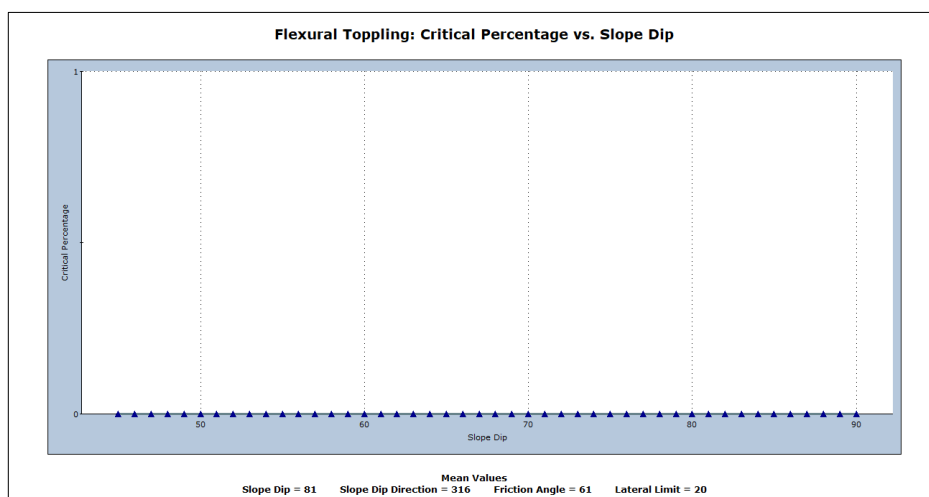
Ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica para a condição de tombamento do bloco oblíquo permanece a mesma para esse intervalo, já para tombamento do bloco direto a porcentagem crítica aumenta de forma não progressiva para até 27% em inclinações superiores a 64° até 90° e diminui para até 9% em inclinações inferiores a 72° , como podem ser vistos na Figura 84. Para a condição de tombamento do bloco por flexão, a variação da inclinação entre 45° e 90° não influencia para o surgimento de uma descontinuidade em situação crítica, segundo a Figura 85, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 84 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 85 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

5.5 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS2

A análise determinística para a seção TS2 Também se deu a partir das descontinuidades críticas identificadas na análise cinemática-probabilística, nessa análise foi detectado condições para ruptura em cunha e tombamento do bloco direto e oblíquo, além de ter sido feito a recomendação para uma avaliação para a condição de ruptura circular.

Os parâmetros geométricos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: altura do talude de 6,62 m, comprimento do topo do talude de 5 m, inclinação da face do talude 81° e inclinação do topo do talude de 0° . Já os parâmetros geomecânicos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: peso específico da rocha de $0,0246 \text{ MN/m}^3$ e peso específico da água igual a $0,01 \text{ MN/m}^3$. Os outros parâmetros variaram dependendo do tipo de análise e limitações dos softwares em relação ao critério de ruptura.

Para o critério de ruptura, os parâmetros variaram dependendo do tipo de análise e limitações dos softwares em relação ao critério de ruptura. Na análise por ruptura circular, o software empregado para essa análise é compatível com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: resistência à compressão uniaxial de 119,86 Mpa; constante m_b de 0,551; constante s de 0,0001 e constante a de 0,508. Já para análise de ruptura em cunha e tombamento, os softwares empregados para essas duas análises não são compatíveis com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, mas eles são compatíveis com o critério de Mohr-Coulomb, podendo também empregar os parâmetros geomecânicos desse critério obtidos do critério Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: ângulo de atrito interno de $61,07^\circ$ e coesão do material de 0,155 Mpa.

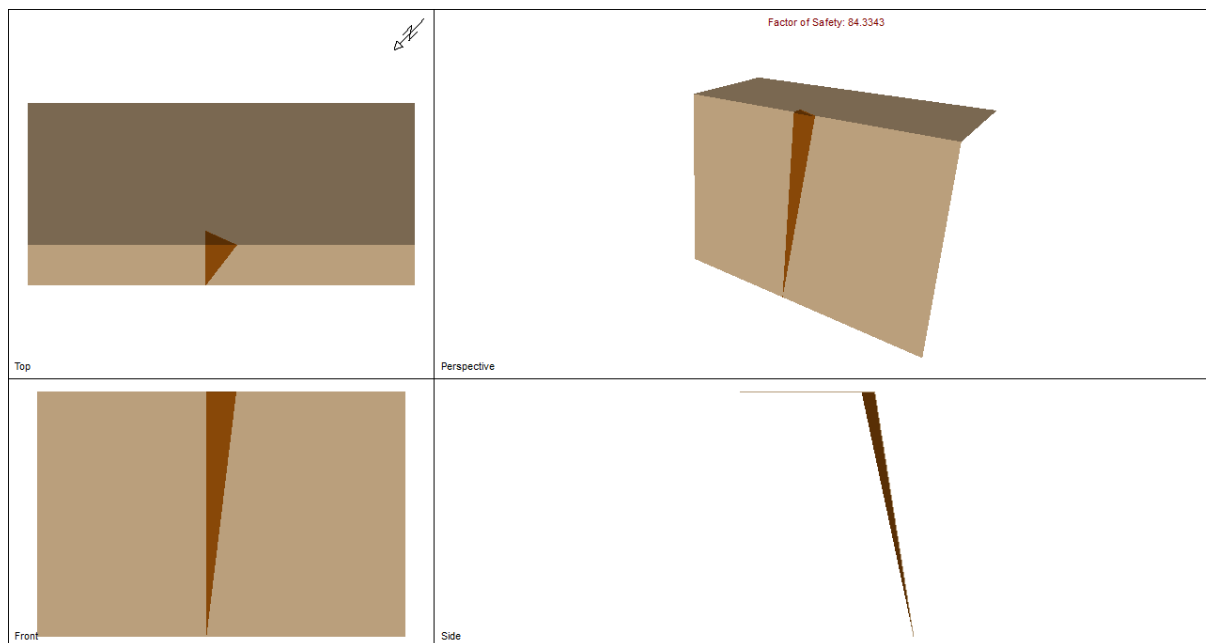
- Ruptura em cunha

Para a condição de ruptura em cunha foi detectado 2 interseções entre descontinuidades críticas na análise cinemática-probabilística, sendo a altitude de orientação entre a interseção que retornou o menor fator de segurança a de $79^\circ/340^\circ$ sofrendo interseção com a de $90^\circ/226^\circ$.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 84,3343 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície formada entre as descontinuidades é 84,3343 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento de massa nessa superfície de interseção. Sendo assim, a interseção de menor fator de segurança com tendência à ruptura em cunha encontra-se bastante estável, com a outra interseção possuindo

um fator de segurança bem maior e, portanto, também estável. A Figura 86 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise e a geometria da interseção entre as descontinuidades em diferentes perspectivas.

Figura 86 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS2

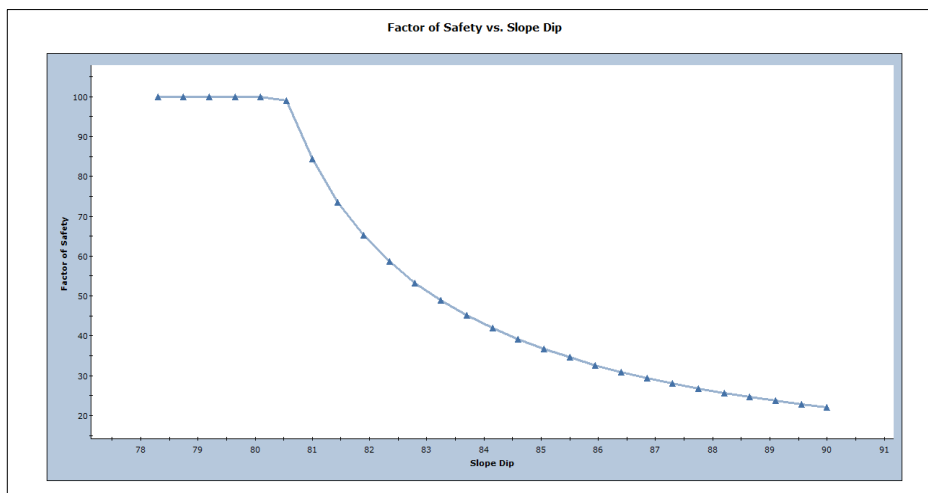


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, foram também avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação no ângulo do talude e da porcentagem de saturação da região da interseção entre as descontinuidades do talude na presença de água. Tendo como resultado que ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 78° até 90° , pois abaixo de 78° o fator de segurança é maior que 100. Mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 22 e com uma redução da inclinação haveria um aumento no fator de segurança, segundo a Figura 87.

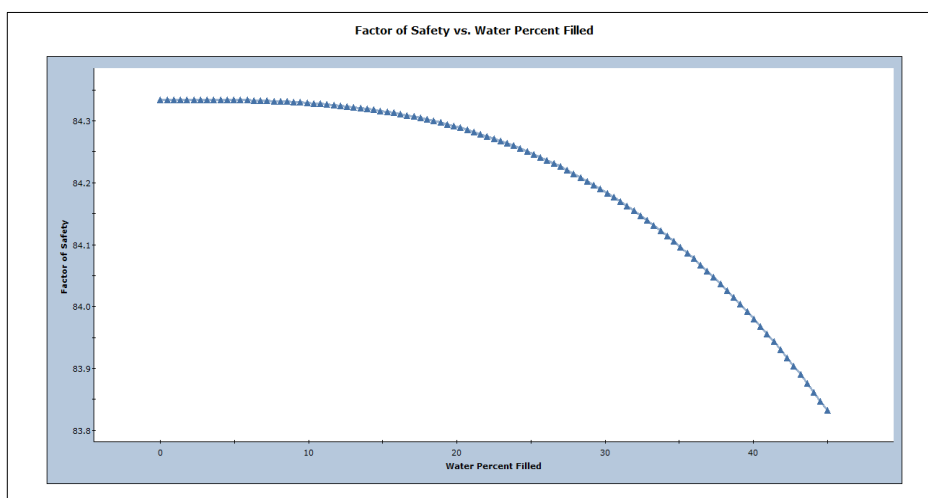
Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação na região da interseção entre as descontinuidades o fator de segurança diminui, sendo que a região crítica perde a resistência ao cisalhamento em uma saturação de 45% e o fator de segurança cai para 0 acima dessa porcentagem crítica de saturação, segundo a Figura 88.

Figura 87 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 88 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

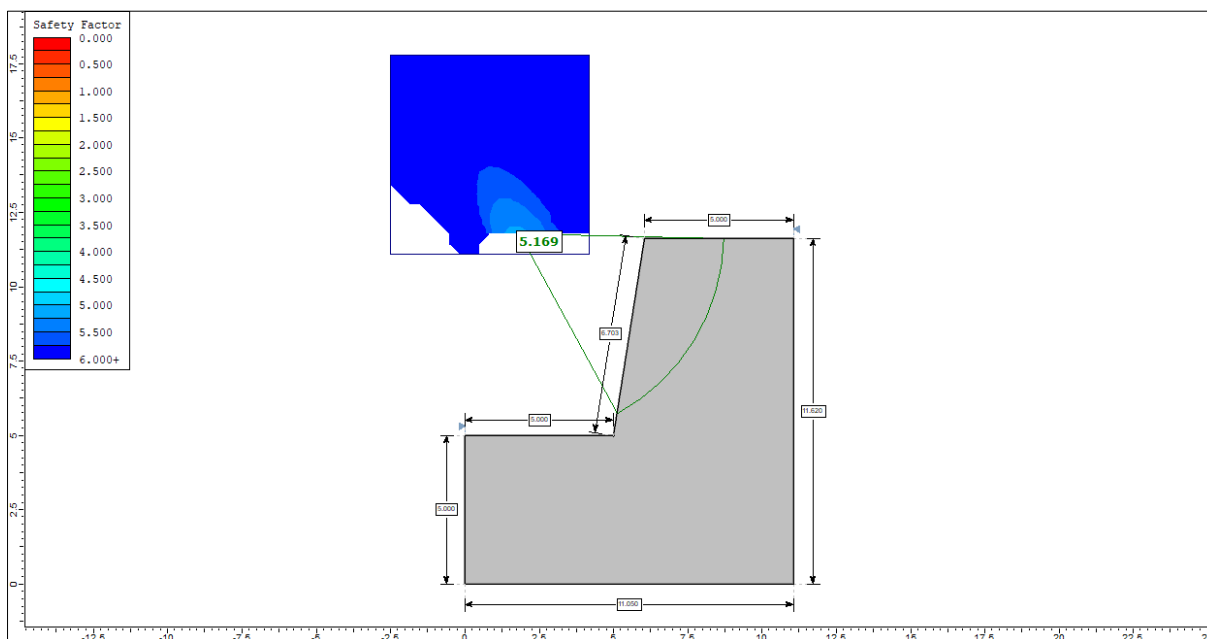
- Ruptura circular

Na análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS2, também foi empregado o método de Bishop Simplificado que emprega metodologias de equilíbrio e limite, sendo adotado uma geometria da fundação de 5 m de altura por 11,05 m de comprimento, com propriedades geomecânicas da rocha de fundação igual as propriedades do talude, como pode ser visto em campo, com uma distância do pé do talude até a crista da fundação de 5 m.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 5,169 sendo esse fator correspondente a superfície potencial de ruptura que retornou o menor fator de toda a varredura

feita na geometria empregada para avaliação do talude. O resultado obtido indica que a força de cisalhamento resistiva para essa superfície potencial é 5,169 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora atuante nessa superfície. A Figura 89 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, localização da superfície potencial de ruptura e uma escala para o fator de segurança.

Figura 89 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

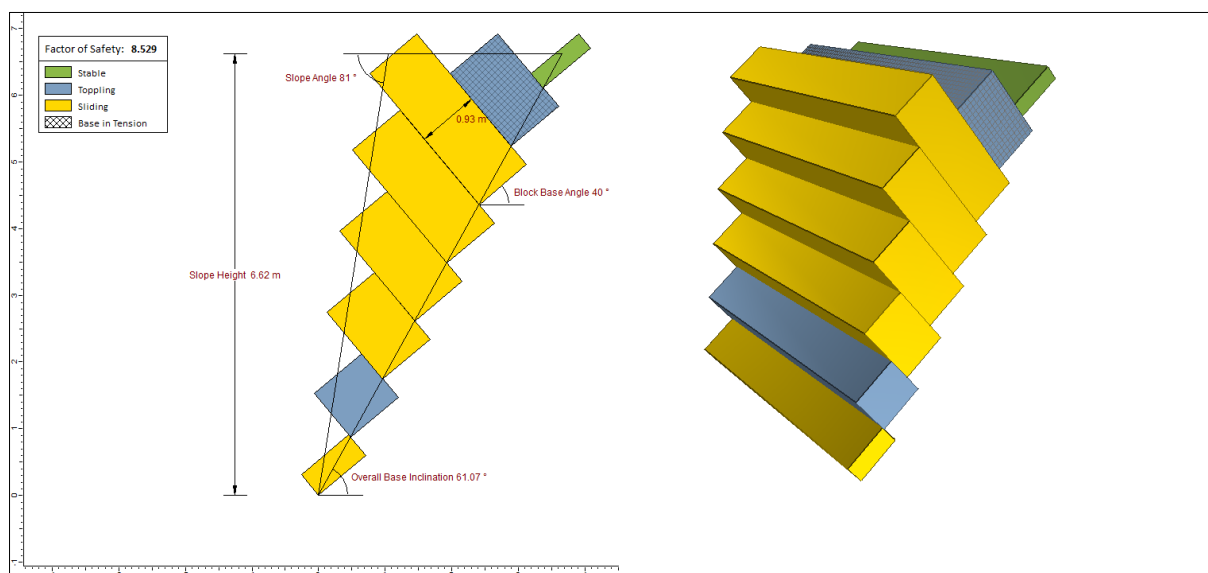
- Ruptura por tombamento

Para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo foi detectado na análise cinemática-probabilística 3 inclinações médias dos blocos críticos sendo elas 50° , 76° e 90° , tendo as descontinuidades presentes no talude espaçamento de 10,25 cm; 70 cm e 93 cm. A inclinação basal adotada para análise teve com valor considerado o do ângulo de atrito interno que é $61,07^\circ$.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 8,529 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície basal dos blocos é 8,529 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento e tombamento do bloco, sendo assim, a combinação que resultou no menor fator de segurança foi a com espaçamento de 93 cm e inclinação do bloco de 50° , possuindo blocos estáveis no topo, uma base e abaixo do topo tombáveis e a maioria dos blocos deslizáveis, com as demais combinações possuindo um fator de segurança bem maior e características semelhantes dos blocos. A Figura 90 demonstra o

resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, das descontinuidades, perspectiva dos blocos e uma tabela com a classificação e legenda das condições para cada bloco.

Figura 90 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2

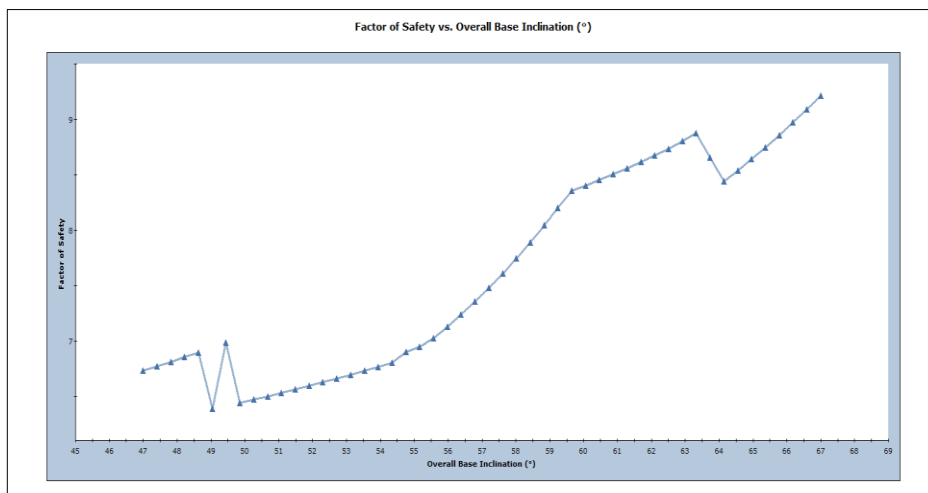


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo, foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação na inclinação basal, no ângulo do talude e da porcentagem de saturação do talude. Tendo como resultado que ao variar a inclinação basal entre 47° a 67° o fator de segurança vai aumentando à medida que se aumenta essa inclinação, alcançando um fator de segurança máximo para a inclinação de 67° de 9,2 e um fator de segurança mínimo para a inclinação de 47° de 6,7 como pode ser visto na Figura 91.

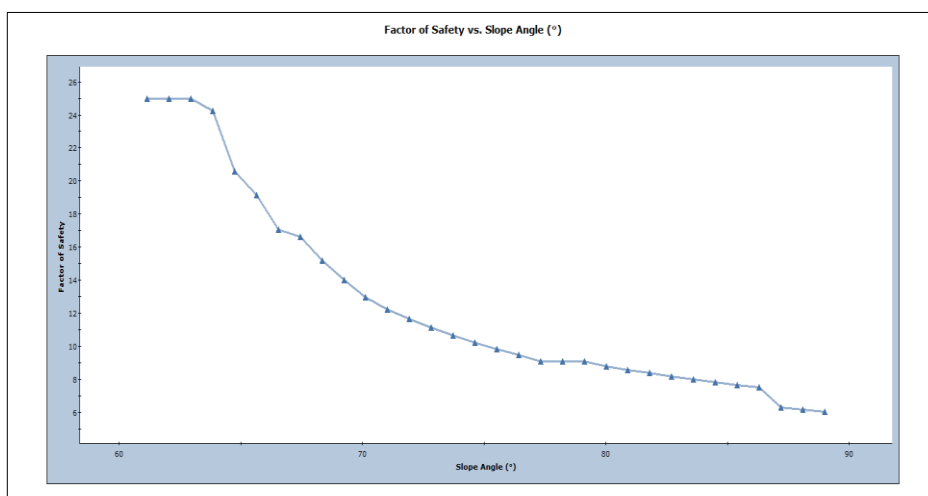
Para a variação da inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 60° até 90° , pois abaixo de 60° a condição de ruptura por tombamento é eliminada, mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 6 e com uma redução da inclinação há um aumento no fator de segurança, segundo a Figura 92. Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação no talude o fator de segurança diminui, sendo que a região crítica não perde a resistência ao cisalhamento nem com uma saturação de 100%, segundo a Figura 93.

Figura 91 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2



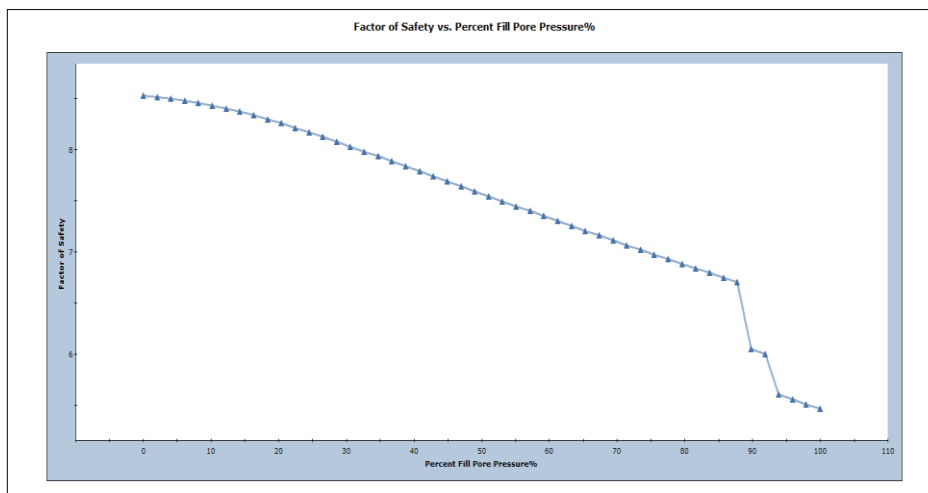
Fonte: Autor, 2022.

Figura 92 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2



Fonte: Autor, 2022.

Figura 93 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS2



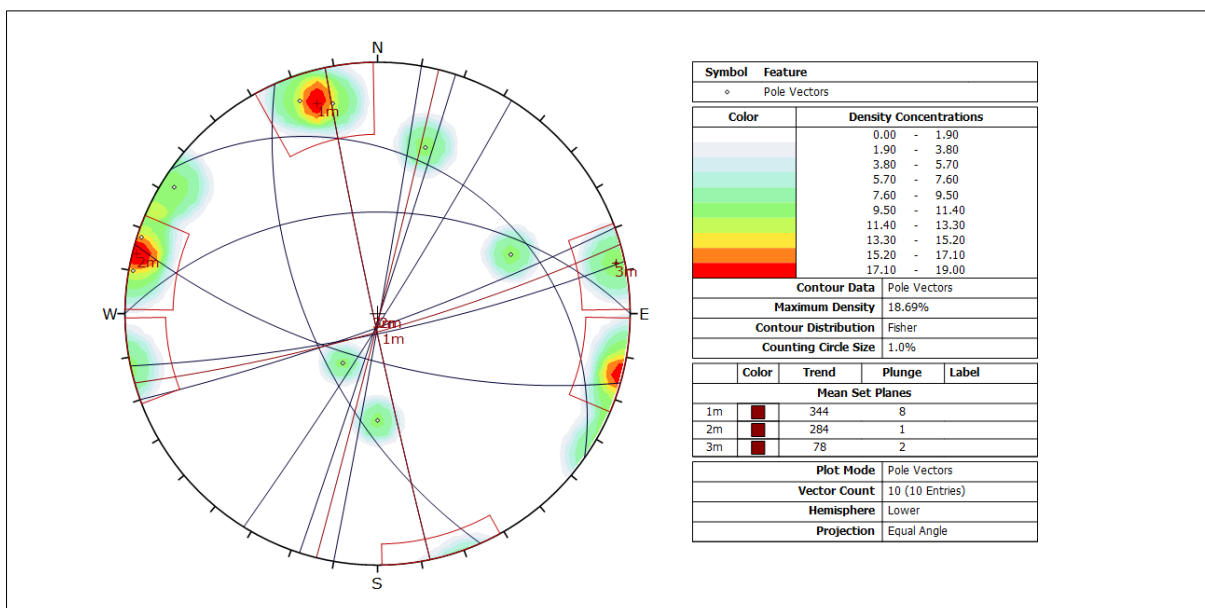
Fonte: Autor, 2022.

5.6 Projeção estereográfica, análise cinemática-probabilística e de sensibilidade para a seção TS3

A projeção estereográfica das discontinuidades principais presentes na seção TS3 foram também realizadas no software Dips (Figura 94). Nessa plotagem tanto os planos e polos das discontinuidades foram exibidos, também foram demarcadas as quatro famílias de discontinuidades, além disso é possível observar também as discontinuidades aleatórias da seção. A projeção empregada foi de igual ângulo e hemisfério baixo.

Para a análise cinemática-probabilística empregou-se o ângulo de atrito interno, anteriormente cálculo de $56,30^\circ$, direção da face talude de 141° , mergulho do talude de 78° e limite inferior e superior da direção da face do talude de $\pm 20^\circ$. A partir da inserção desses dados no software Dips, o mesmo gera o círculo de atrito interno, zona crítica e limites superior e inferior em relação a direção da face do talude.

Figura 94 - Projeção estereográfica da seção TS3

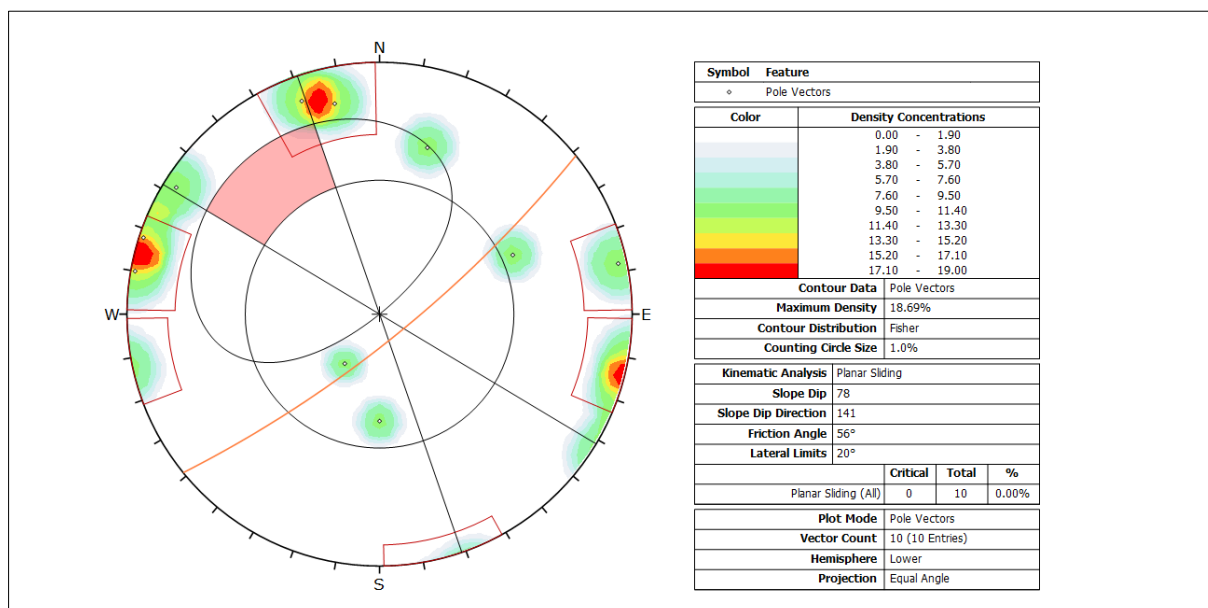


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura planar

Para análise da condição de ruptura planar (Figura 95), nenhuma descontinuidade encontra-se em estado crítico para sofrer ruptura, possuindo uma probabilidade nula para esse tipo de ruptura.

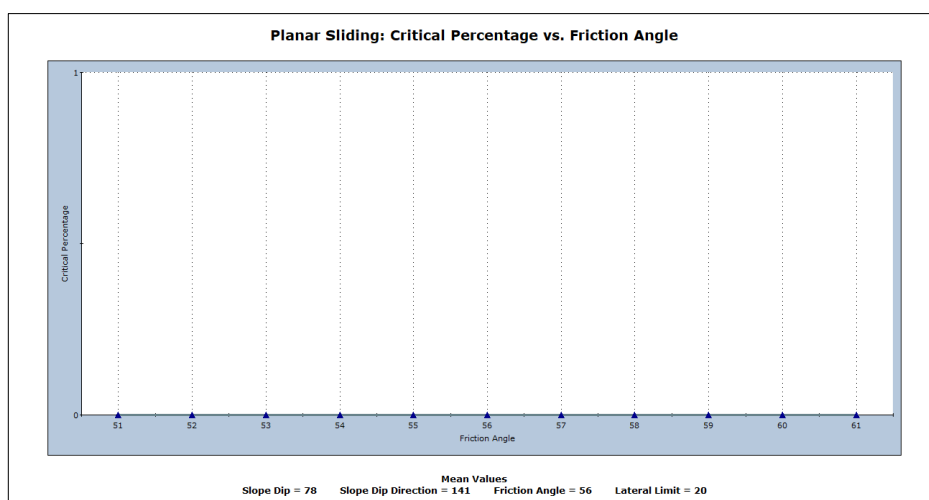
Figura 95 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura planar na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

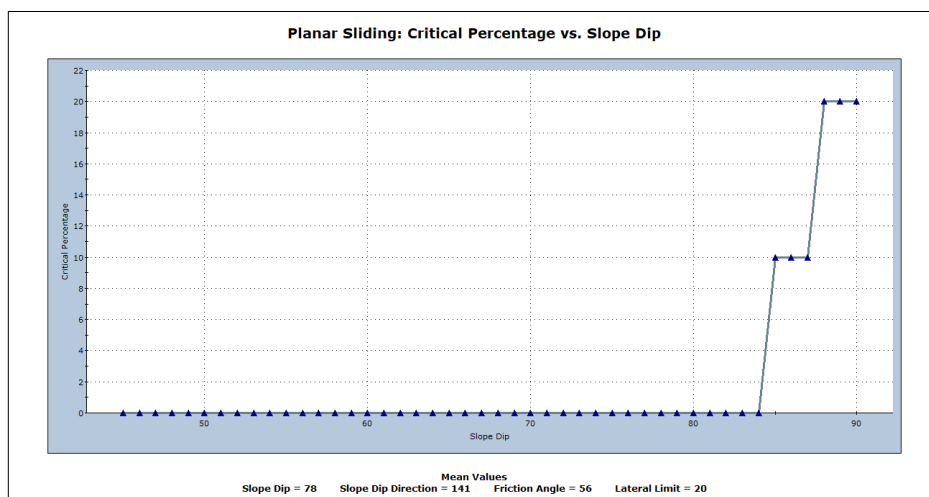
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura planar, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor da coesão e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $56,30^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece nula para esse intervalo de variabilidade do valor, como pode ser visto na Figura 96. Já ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica aumenta para até 20% devido a descontinuidades ficarem críticas para esse tipo de ruptura em inclinações superiores a 84° até 90° e será nula para inclinações inferiores a 84° , segundo a Figura 97.

Figura 96 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura planar na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 97 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura planar na seção TS3

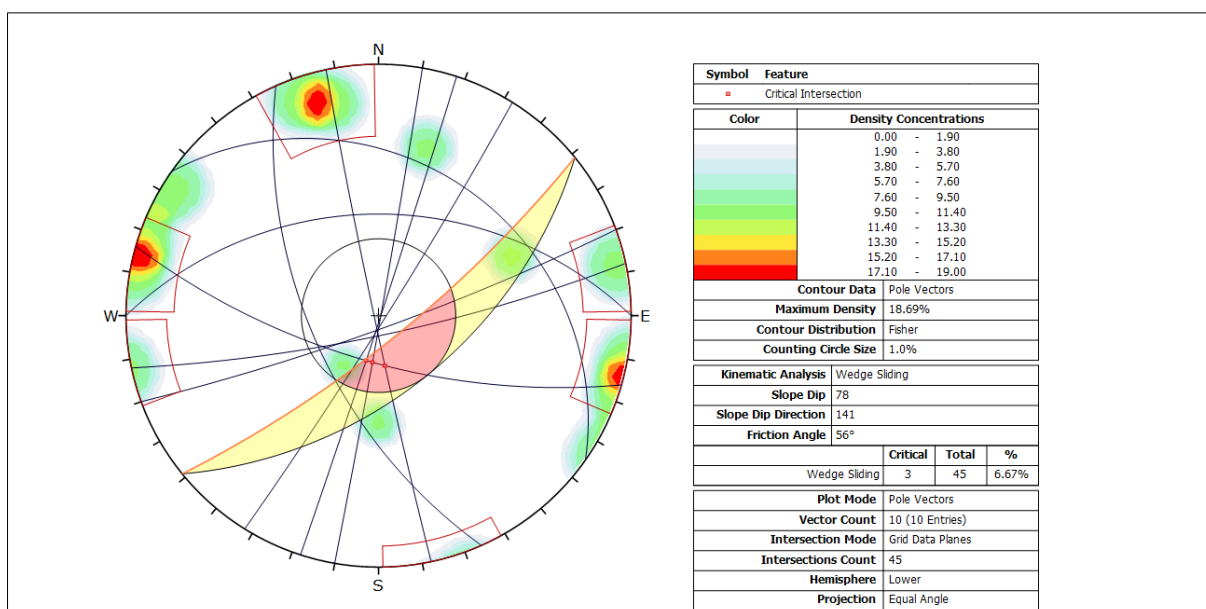


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura em cunha

Para análise da condição de ruptura em cunha (Figura 98), verificou-se a detecção de 3 interseções entre descontinuidades presentes nas zonas críticas, sendo as três interseções na zona crítica primária e nenhuma na zona crítica secundária. Das 10 descontinuidades da seção gerou-se 45 interseções globais, sendo as críticas com altitude de $69^{\circ}/196^{\circ}$ sofrendo interseção com a $88^{\circ}/258^{\circ}$, $89^{\circ}/100^{\circ}$ e $89^{\circ}/108^{\circ}$. As descontinuidades da zona crítica primária apresentam mergulho superior ao ângulo de atrito interno e três com mergulho superior à inclinação do talude. A probabilidade de ruptura em cunha é de 6,67%.

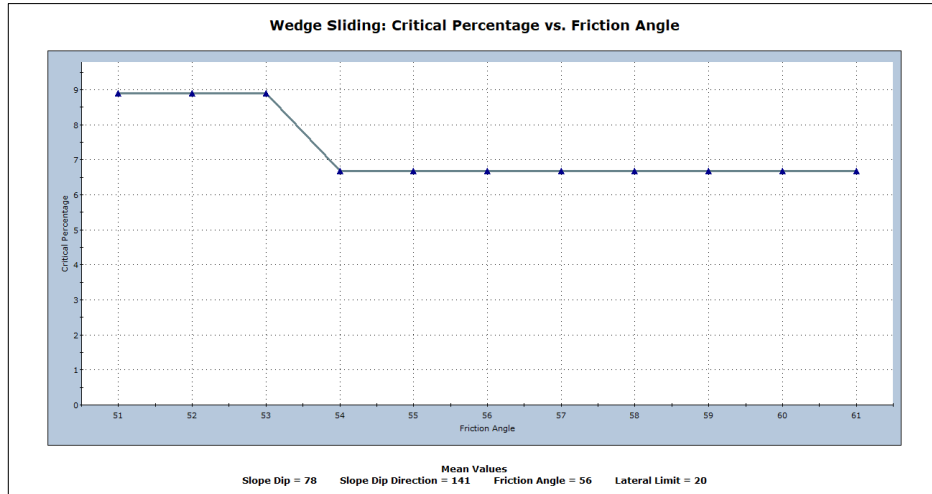
Figura 98 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de ruptura em cunha na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

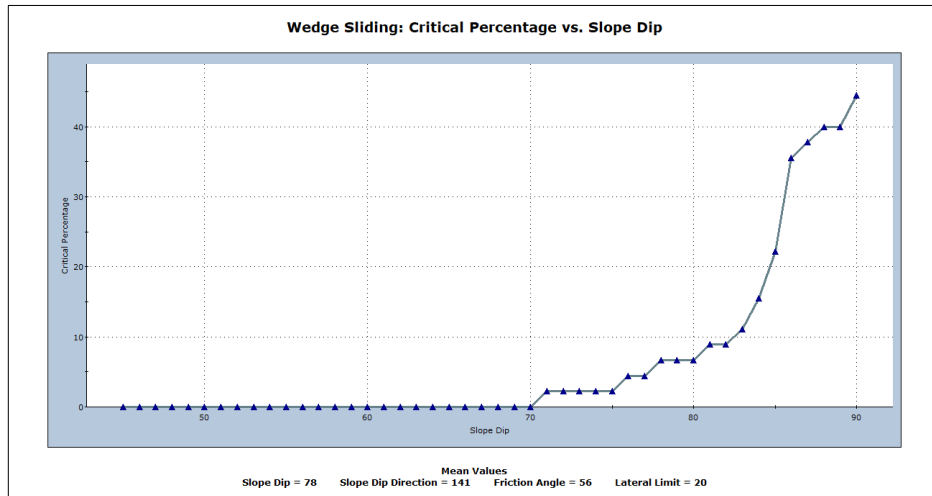
Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que corresponde a $56,30^{\circ}$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para um valor maior que 56° e aumenta para um valor menor que 54° sendo que, esse aumento interfere muito pouco no valor da porcentagem crítica, como pode ser visto na Figura 99. Já ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica aumenta de forma quase que progressiva para até 45% em inclinações superiores a 70° até 90° e será nula para inclinações inferiores a 70° , segundo a Figura 100.

Figura 99 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de ruptura em cunha na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 100 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3

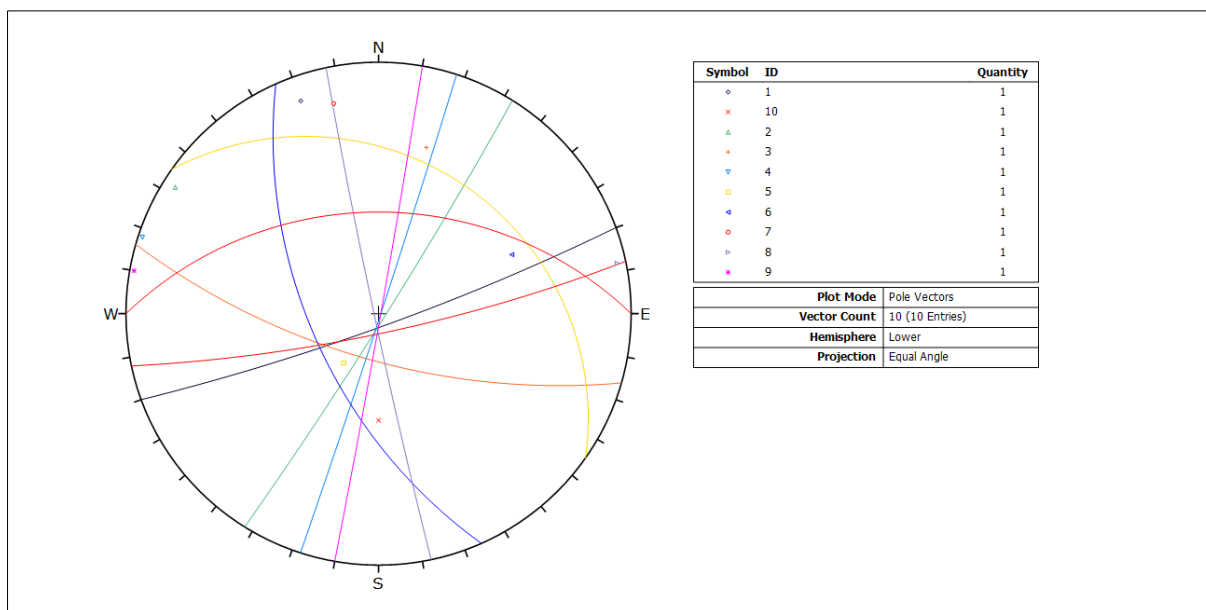


Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura circular

A avaliação da orientação das descontinuidades da seção analisada, indica um padrão de orientação medianamente variado das descontinuidades, possuindo uma condição de médio padrão de dispersão, tendo também uma chance muito mínima de sofrer ruptura circular global, mas deve ser feito também uma análise por equilíbrio e limite para avaliação de uma possível superfície potencial de ruptura. A Figura 101 traz a projeção dos planos e polos das 10 descontinuidades medidas na seção.

Figura 101 - Projeção dos planos das discontinuidades na seção TS3



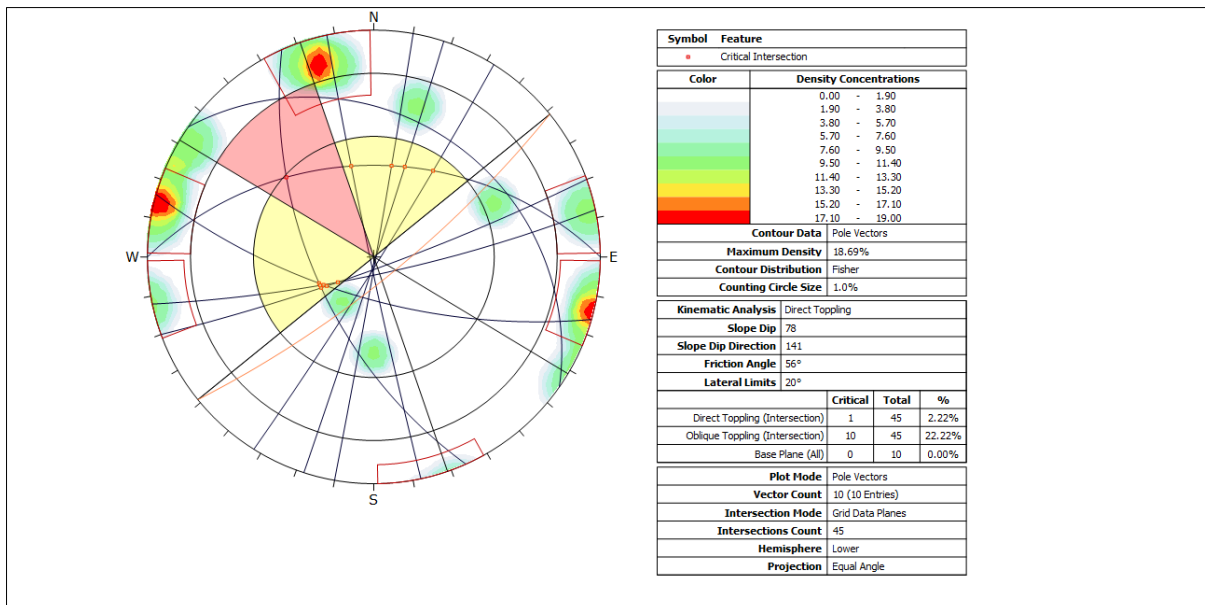
Fonte: Autor, 2022.

- Ruptura por tombamento

Para análise da condição de ruptura por tombamento também foi avaliado para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo (Figura 102) e para tombamento por flexão (Figura 103). Na condição de tombamento do bloco direto, 1 interseção está presente na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 2,22%. Já para a condição de tombamento do bloco oblíquo, 10 interseções estão presentes na zona crítica de um total de 45 interseções globais, possuindo uma probabilidade de ruptura de 22,22%.

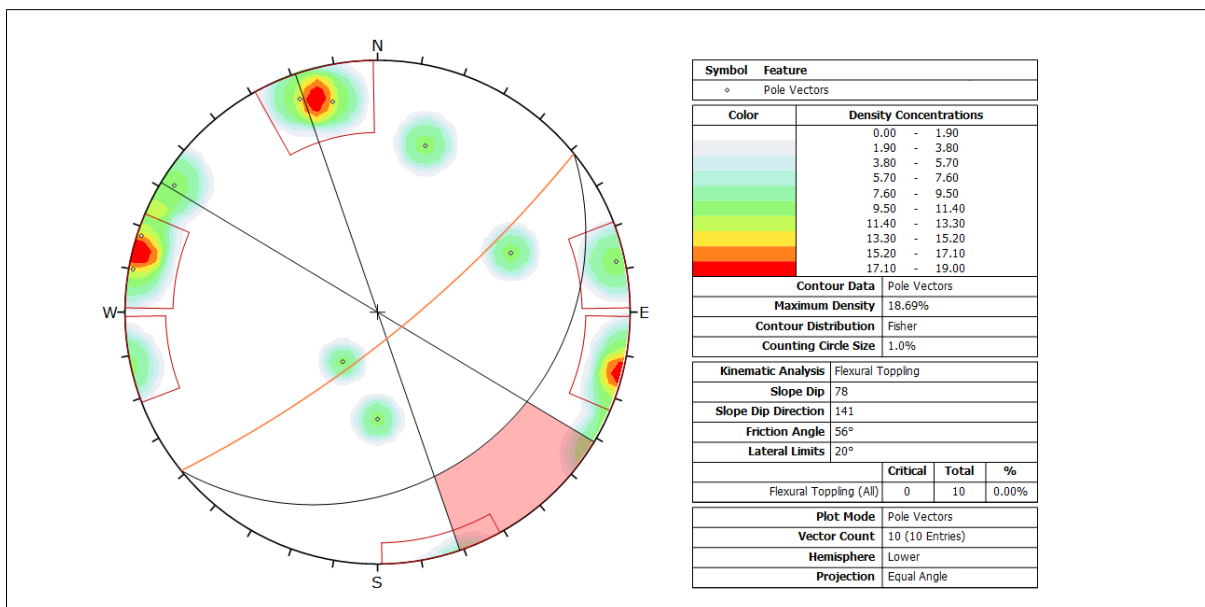
Para a condição de tombamento por flexão, nenhuma descontinuidade está presente na zona crítica, possuindo uma probabilidade nula para esse tipo de ruptura. As inclinações médias dos blocos críticos foram de 46°, 64° e 86°.

Figura 102 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 103 - Resultado da análise cinemática-probabilística para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3

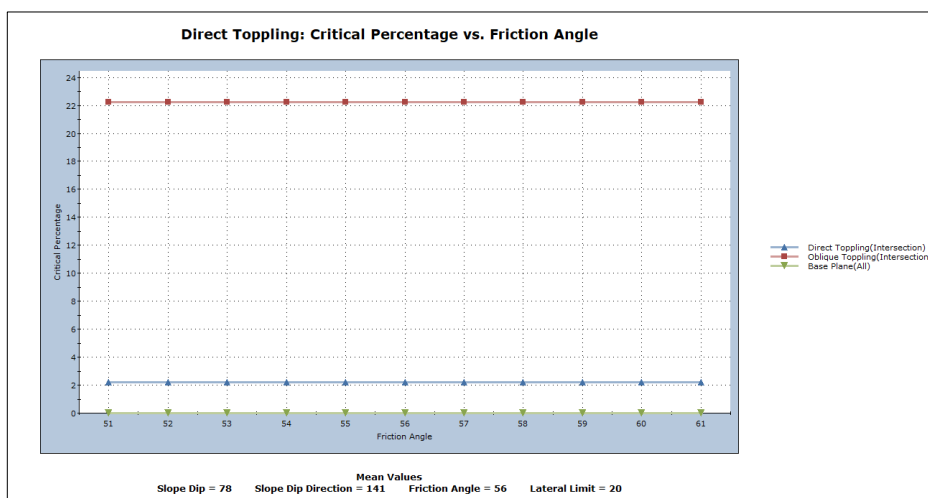


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo e para tombamento do bloco por flexão, também foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variabilidade do valor do ângulo de atrito interno e da variação no ângulo do talude. Tendo como resultado que ao variar o valor do ângulo de atrito interno que

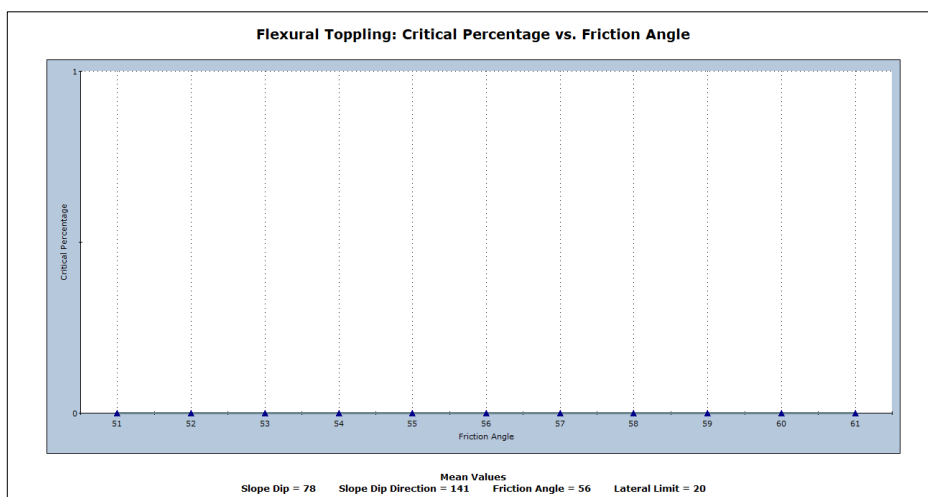
corresponde a $56,30^\circ$ entre ± 5 , a porcentagem crítica permanece a mesma para valores maiores e menores que 56° tanto para tombamento do bloco direto e oblíquo, como podem ser vistos na Figura 104. Já a variabilidade no valor do ângulo de atrito interno, não influencia para o surgimento de uma descontinuidade crítica para a condição de tombamento do bloco por flexão, segundo a Figura 105, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 104 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 105 - Porcentagem crítica versus ângulo de atrito interno para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS2

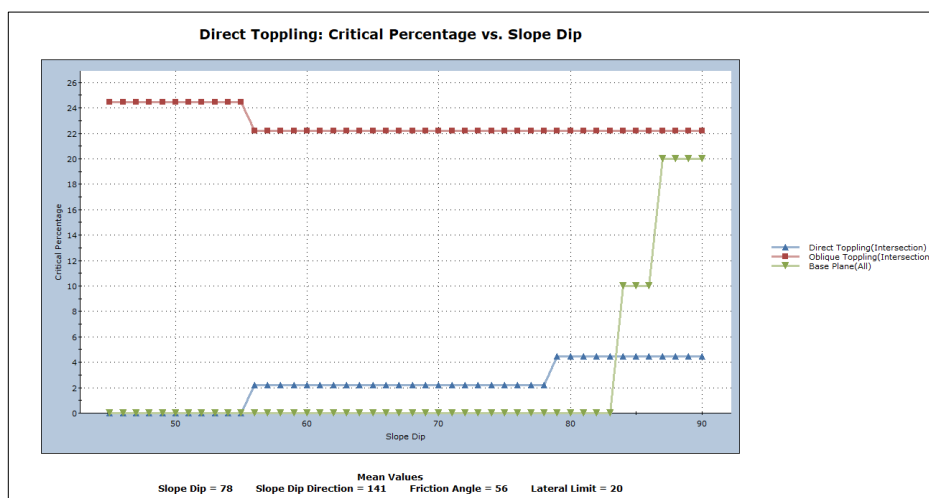


Fonte: Autor, 2022.

Ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° a porcentagem crítica para a condição de tombamento do bloco oblíquo permanece a mesma para valores maiores que 56°

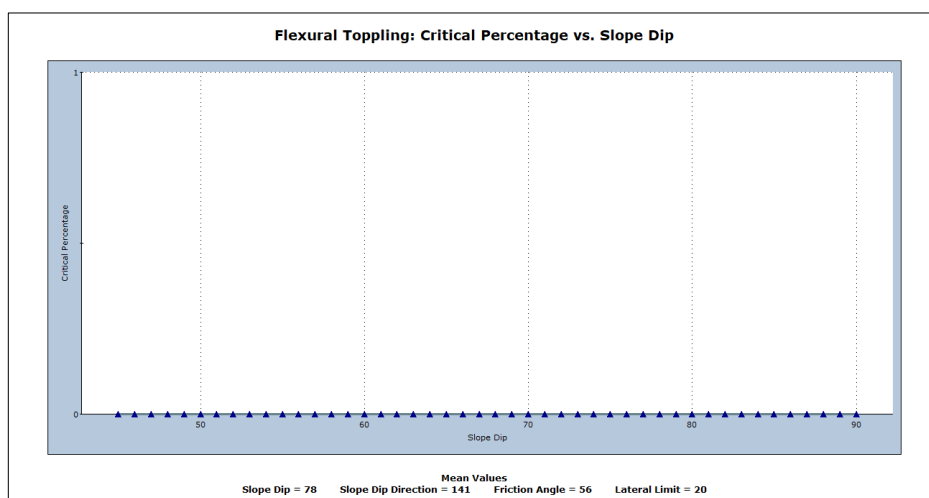
até 90° e aumenta para até 24,5% em inclinações menores que 56°, já para tombamento do bloco direto a porcentagem crítica aumenta de forma não progressiva para até 4,1% em inclinações superiores a 55° até 90° e diminui para zero em inclinações inferiores a 55°, como é possível observar na Figura 106. Para a condição de tombamento do bloco por flexão, a variação da inclinação entre 45° e 90° não influencia para o surgimento de uma descontinuidade em situação crítica, segundo a Figura 107, permanecendo com porcentagem crítica nula.

Figura 106 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 107 - Porcentagem crítica versus inclinação do talude para a condição de tombamento do bloco por flexão na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

5.7 Análise determinística e de sensibilidade para a seção TS3

A análise determinística para a seção TS3 Também se deu a partir das descontinuidades críticas identificadas na análise cinemática-probabilística, nessa análise assim como a seção TS2 foi detectado condições para ruptura em cunha e tombamento do bloco direto e oblíquo, além de ter sido feito a recomendação para uma avaliação para a condição de ruptura circular.

Os parâmetros geométricos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: altura do talude de 4,36 m, comprimento do topo do talude de 5 m, inclinação da face do talude 78° e inclinação do topo do talude de 0° . Já os parâmetros geomecânicos iguais para ambos os métodos de análises foram os seguintes: peso específico da rocha de $0,0254 \text{ MN/m}^3$ e peso específico da água igual a $0,01 \text{ MN/m}^3$. Os outros parâmetros variaram dependendo do tipo de análise e limitações dos softwares em relação ao critério de ruptura.

Para o critério de ruptura, os parâmetros variaram dependendo do tipo de análise e limitações dos softwares em relação ao critério de ruptura. Na análise por ruptura circular, o software empregado para essa análise é compatível com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: resistência à compressão uniaxial de 66,83 Mpa; constante m_b de 0,322; constante s de 0,0000299 e constante a de 0,513. Já para análise de ruptura em cunha e tombamento, os softwares empregados para essas duas análises não são compatíveis com o critério de ruptura de Hoek-Brown Generalizado, mas eles são compatíveis com o critério de Mohr-Coulomb, podendo também empregar os parâmetros geomecânicos desse critério obtidos do critério Hoek-Brown Generalizado, sendo os parâmetros geomecânicos a serem empregados os seguintes: ângulo de atrito interno de $56,30^\circ$ e coesão do material de 0,065 Mpa.

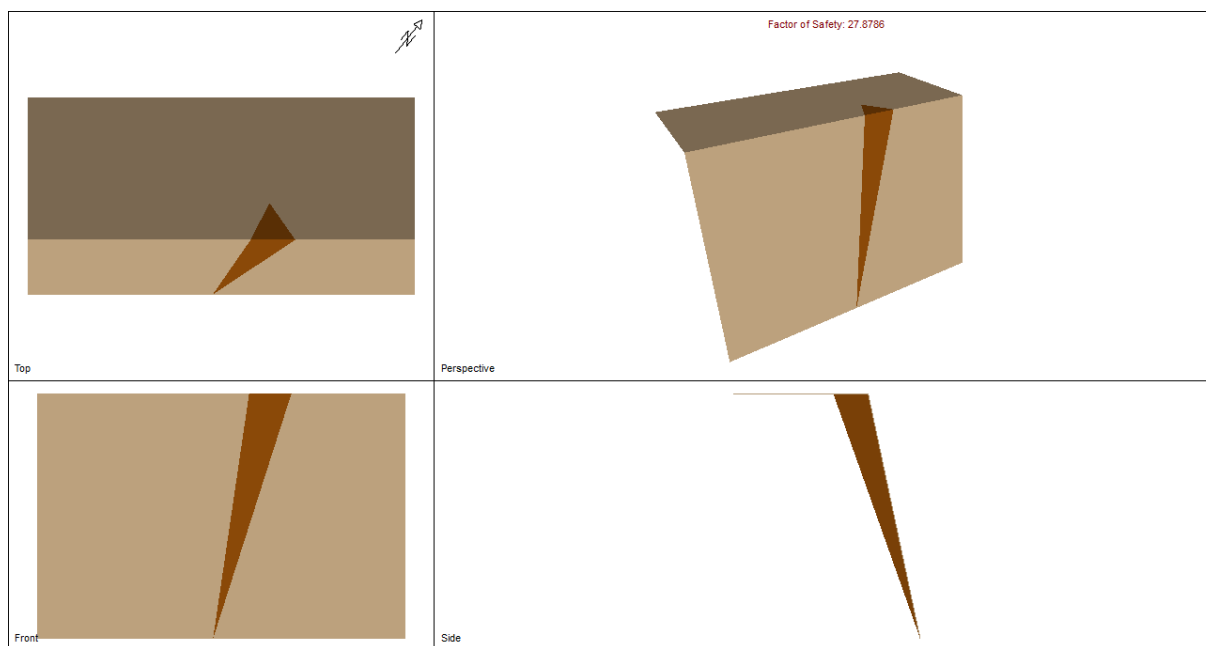
- Ruptura em cunha

Para a condição de ruptura em cunha foi detectado 3 interseções entre descontinuidades críticas na análise cinemática-probabilística, sendo a altitude de orientação entre a interseção que retornou o menor fator de segurança a de $69^\circ/196^\circ$ sofrendo interseção com a de $88^\circ/258^\circ$.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 27,8786 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície formada entre as descontinuidades é 27,8786 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento de massa nessa superfície de interseção. Sendo assim, a interseção de menor fator de segurança com

tendência à ruptura em cunha encontra-se bastante estável, com as outras interseções possuindo um fator de segurança bem maior e, portanto, também estáveis. A Figura 108 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise e a geometria da interseção entre as descontinuidades em diferentes perspectivas.

Figura 108 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura em cunha na seção TS3

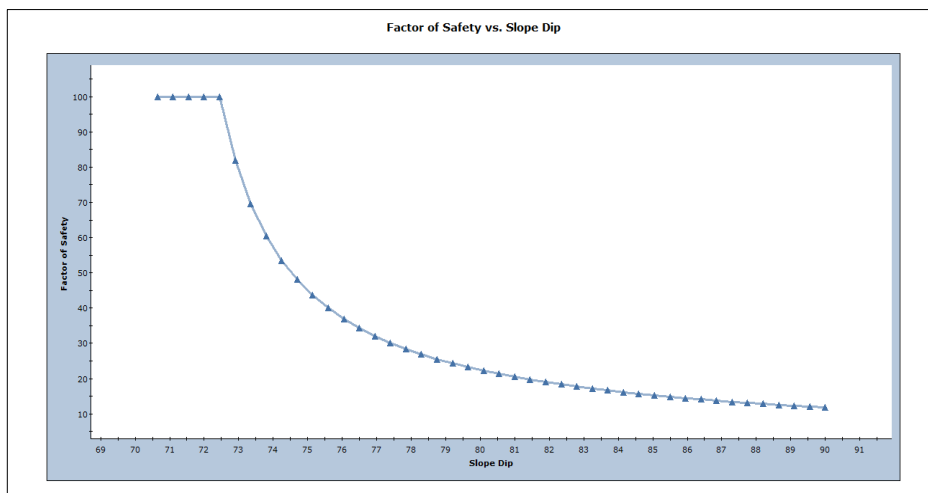


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura em cunha, foram também avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação no ângulo do talude e da porcentagem de saturação da região da interseção entre as descontinuidades do talude na presença de água. Tendo como resultado que ao variar a inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 70° até 90° , pois abaixo de 70° o fator de segurança é maior que 100. Mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 12 e com uma redução da inclinação haveria um aumento no fator de segurança, segundo a Figura 109.

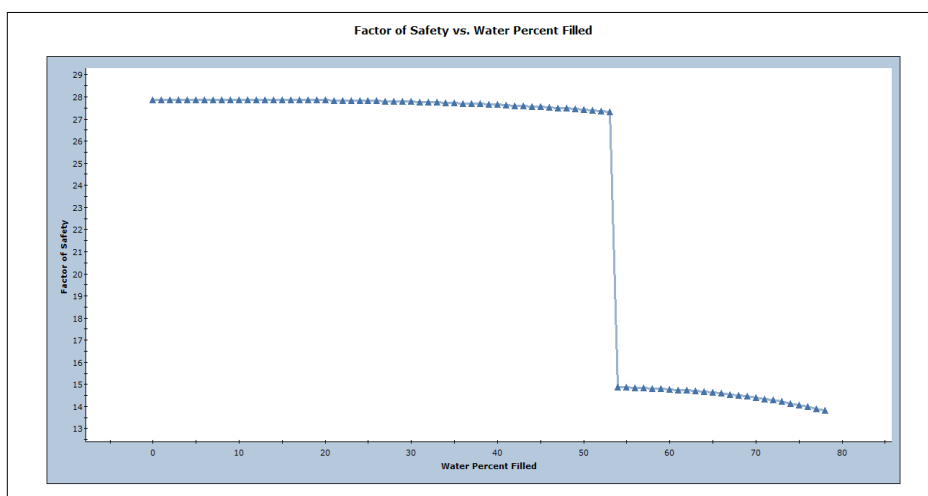
Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação na região da interseção entre as descontinuidades o fator de segurança diminui e tem uma queda bem elevada em uma saturação acima de 53%, sendo que a região crítica perde a resistência ao cisalhamento em uma saturação de 78% e o fator de segurança cai para 0 acima dessa porcentagem crítica de saturação, segundo a Figura 110.

Figura 109 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 110 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura em cunha na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

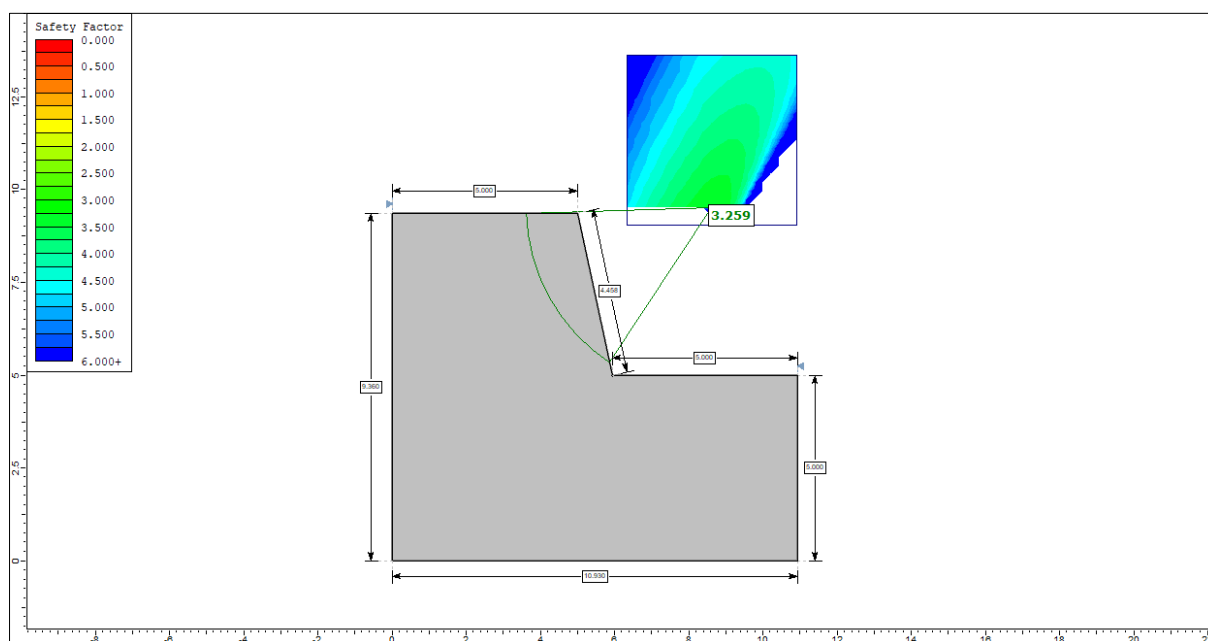
- Ruptura circular

Na análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS3, também foi empregado o método de Bishop Simplificado que emprega metodologias de equilíbrio e limite, sendo adotado uma geometria da fundação de 5 m de altura por 10,93 m de comprimento, com propriedades geomecânicas da rocha de fundação igual as propriedades do talude, como pode ser visto em campo, com uma distância do pé do talude até a crista da fundação de 5 m.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 3,259 sendo esse fator correspondente a superfície potencial de ruptura que retornou o menor fator de toda a varredura

feita na geometria empregada para avaliação do talude. O resultado obtido indica que a força de cisalhamento resistiva para essa superfície potencial é 3,259 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora atuante nessa superfície. A Figura 111 demonstra o resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, localização da superfície potencial de ruptura e uma escala para o fator de segurança.

Figura 111 - Resultado da análise determinística para a condição de ruptura circular na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

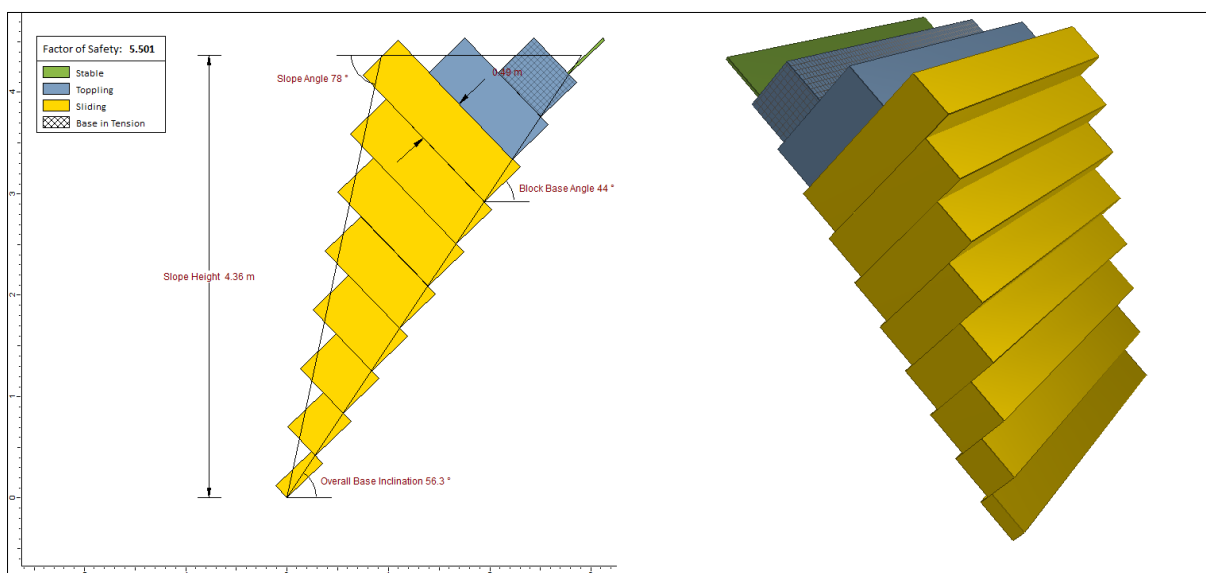
- Ruptura por tombamento

Para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo foi detectado na análise cinemática-probabilística 3 inclinações médias dos blocos críticos sendo elas 46°, 64° e 86°, tendo as descontinuidades presentes no talude espaçamento de 9 cm; 25 cm e 49 cm. A inclinação basal adotada para análise teve com valor considerado o do ângulo de atrito interno que é 56,30°.

Esta análise resultou em um fator de segurança de 5,501 indicando que a força de cisalhamento resistiva atuante na superfície basal dos blocos é 5,501 vezes maior que a força de cisalhamento mobilizadora que favorece ao movimento e tombamento do bloco, sendo assim, a combinação que resultou no menor fator de segurança foi a com espaçamento de 49 cm e inclinação do bloco de 46°, possuindo blocos estáveis no topo, blocos abaixo do topo tombáveis e a maioria dos blocos deslizáveis, com as demais combinações possuindo um fator de segurança bem maior e características semelhantes dos blocos. A Figura 112 demonstra o

resultado do fator de segurança exibido pelo software para essa análise, geometria do talude, das descontinuidades, perspectiva dos blocos e uma tabela com a classificação e legenda das condições para cada bloco.

Figura 112 - Resultado da análise determinística para a condição de tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3

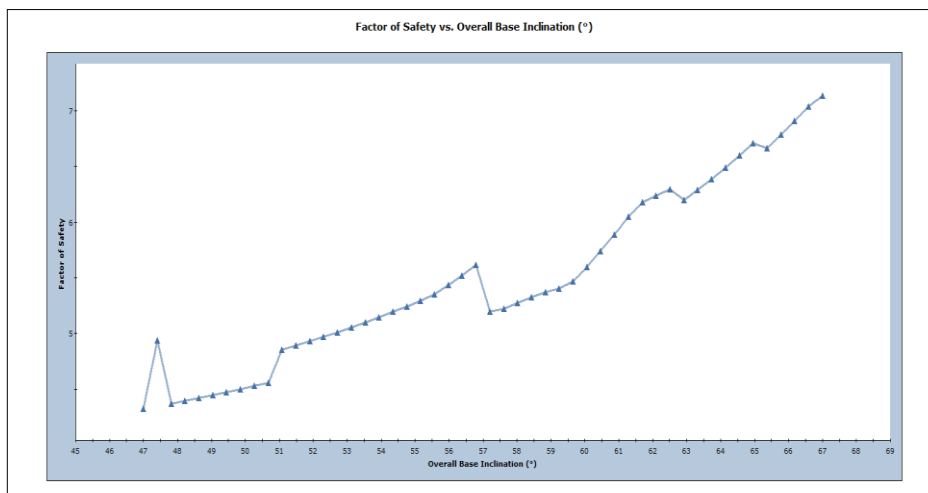


Fonte: Autor, 2022.

Na análise de sensibilidade para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo, foram avaliados os gráficos gerados pelo software para a variação na inclinação basal, no ângulo do talude e da porcentagem de saturação do talude. Tendo como resultado que ao variar a inclinação basal entre 47° a 67° o fator de segurança vai aumentando à medida que se aumenta essa inclinação, alcançando um fator de segurança máximo para a inclinação de 67° de 7,1 e um fator de segurança mínimo para a inclinação de 47° de 4,3 como pode ser visto na Figura 113.

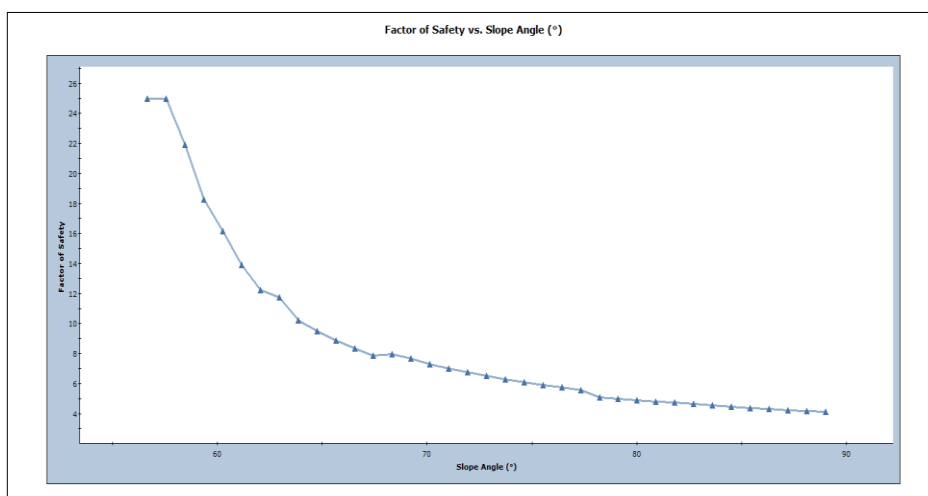
Para a variação da inclinação do talude entre 45° a 90° o software retorna apenas um intervalo entre 50° até 90° , pois abaixo de 60° a condição de ruptura por tombamento é eliminada, mas o resultado indica que caso a inclinação fosse aumentada até 90° o fator de segurança diminuiria para menos de 4,5 e com uma redução da inclinação há um aumento no fator de segurança, segundo a Figura 114. Já para a condição de saturação na presença de água para um intervalo de 0% a 100% é possível notar que à medida que aumenta a porcentagem de saturação no talude o fator de segurança diminui, sendo que a região crítica não perde a resistência ao cisalhamento nem com uma saturação de 100%, segundo a Figura 115.

Figura 113 - Fator de segurança versus inclinação basal para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3



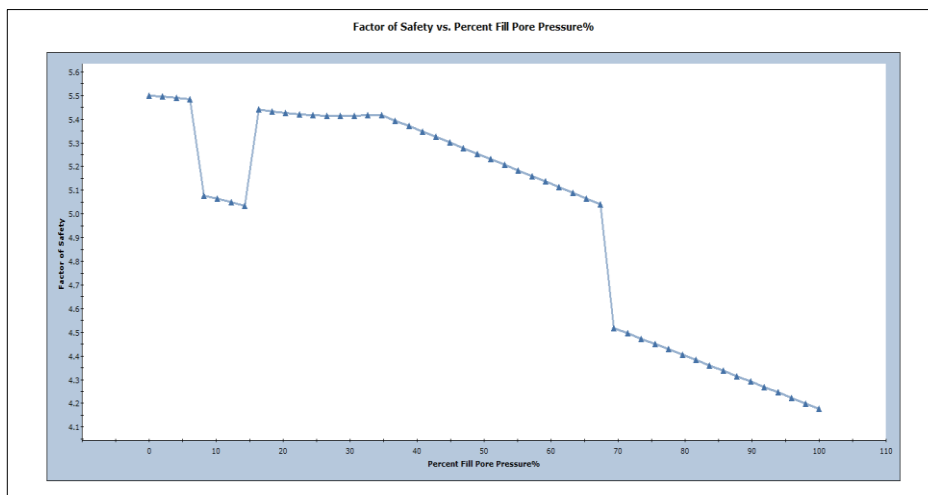
Fonte: Autor, 2022.

Figura 114 - Fator de segurança versus inclinação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

Figura 115 - Fator de segurança versus porcentagem de saturação do talude para a condição de ruptura por tombamento do bloco direto e oblíquo na seção TS3



Fonte: Autor, 2022.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados alcançados no desenvolvimento do presente trabalho, é possível atestar que não só o objetivo geral, mas também todos os objetivos específicos foram alcançados. Devido a escala dos dois taludes do corte de estrada selecionados para a realização dos estudos serem da classe de maciço rochoso, foi necessário a divisão em seções para uma melhor realização dos estudos, devido a alterabilidade das superfícies dos taludes variar bastante ao longo de sua extensão, além de serem completamente anisotrópicos e com propriedades geométricas e geomecânicas diferentes.

Na etapa de mapeamento geológico-geotécnico, as três seções analisadas estavam contidas em dois taludes, sendo a rocha predominante em ambos, classificada como um ortogneisse bandado com presença de xistosidade de alta temperatura. Os dois taludes foram classificados como sendo do tipo artificial, devido terem sido escavados com emprego de explosivos, gerando bastante perturbação no maciço remanescente. As estruturas das descontinuidades que foram identificadas são dos mais variados tipos, com destaque para fraturas de extensão do tipo fissuras, veios e juntas.

A orientação para as três seções possui uma variabilidade média moderada, para as dez medições feitas em cada seção. Já as características geomecânicas indicam algumas semelhanças entre as seções para determinadas características. A persistência, abertura, espaçamento, intemperismo e resistência das paredes é quase igual para as seções TS1 e TS3, sendo que elas são paralelas e pertencem aos taludes sudeste e noroeste respectivamente. Já o preenchimento, infiltração, famílias de descontinuidades e tamanho ou forma dos blocos é quase igual para as seções TS1 e TS2, sendo que elas pertencem ao mesmo talude nomeado de sudeste.

A partir do modelo matemático escolhido para o trabalho, todos os parâmetros para o critério de Hoek-Brown Generalizado foram direcionados para as três seções alvo do estudo. A estimativa da resistência à compressão uniaxial com emprego do Martelo de Schmidt demonstrou-se eficiente, ao selecionar a moda dos valores de rebote e emprego dos dados para composição da média entre ± 5 do valor da moda. A altura do talude desenvolveu-se a partir do valor medido da distância entre o pé e a crista do talude e inclinação, com posteriormente emprego de cálculo trigonométrico.

A densidade da rocha foi determinada para os dois taludes, possuindo uma variação não muito grande. O GSI direcionado foi igual para as seções TS1 e TS2 e diferente para a seção TS3. Já o fator de distúrbio foi igual para as três seções. As constantes do critério

encontradas foram iguais para as seções TS1 e TS2, pois ambas possuem o mesmo valor de GSI e fator de distúrbio e diferentes para a seção TS3, sendo que para cada seção foi obtido os valores de coesão e ângulo de atrito interno a partir do critério.

A avaliação via análise cinemática-probabilística das seções TS1, TS2 e TS3 indicou condições para ruptura planar apenas na seção TS1 e condições para ruptura em cunha e tombamento do bloco direto e oblíquo em todas as seções, sendo que, para seção TS1 a condição de ruptura em cunha apresentou o maior valor de probabilidade de ruptura de 31,11%, e para a seção TS2 e TS3 a condição de tombamento do bloco oblíquo apresentou o maior valor de probabilidade de ruptura de 13,33% e 22,22% respectivamente.

Na análise de sensibilidade para avaliação da variabilidade dos valores obtidos nas análises cinemáticas-probabilísticas, a variabilidade de ± 5 no valor do ângulo de atrito interno, gerou uma interferência discreta no valor da porcentagem crítica para as três seções e, em alguns casos, não alterou em nada o valor da porcentagem crítica. Já para a variação na inclinação do talude entre 45° a 90° indicou que para a seção TS1 uma inclinação menor que 65° é a ideal, na seção TS2 a inclinação ideal deve ser menor que 64° e para a seção TS3 a inclinação ideal tem que ser menor que 55° . Essas inclinações sugeridas eliminam as condições para ruptura planar na seção TS1 e as condições para ruptura em cunha e reduzem para próximo de zero a condição de tombamento do bloco direto para as três seções, sendo que, os blocos oblíquos são difíceis de serem eliminados.

A análise determinística das seções TS1, TS2 e TS3 foram feitas em função dos tipos de rupturas críticas detectadas nas análises cinemáticas-probabilísticas e, também foram realizadas análises para condições de ruptura circular. Os fatores de segurança encontrados nas análises são bem maiores que um, indicando que mesmo estando em condições para sofrer um tipo específico de ruptura, a resistência ao cisalhamento da descontinuidade é bem maior que a força mobilizadora cisalhante na superfície crítica, garantindo assim a estabilidade das descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Na análise de sensibilidade para avaliação da variabilidade dos valores obtidos nas análises determinísticas, a variação da inclinação do talude entre 45° a 90° indicou que para inclinações maiores que a adotado no talude, o fator de segurança diminui e para inclinações menores que a adotada o fator de segurança aumenta. Para a variação na porcentagem de saturação de água do talude de 0% a 100%, a seção TS1 perde a resistência ao cisalhamento em uma saturação de 19% para a condição de ruptura planar, na seção TS2 a resistência ao cisalhamento é perdida em uma saturação de 45% para a condição de ruptura em cunha, e na seção TS3 a resistência ao cisalhamento é perdida em uma saturação de 78%. A variabilidade

da inclinação basal entre 47° a 67° indicou para as três seções que ao aumentar esse valor de inclinação da base de sustentação dos blocos, o fator de segurança aumenta, alcançando um valor máximo próximo de 67° e de mínimo próximo de 47° , mas dependendo da inclinação real dessa base, pode favorecer ao deslizamento dos blocos, pois em todas as seções há predomínio de blocos favoráveis ao deslizamento.

Ao empregar apenas a análise cinemática-probabilística para avaliação do talude, levaria ao direcionamento em urgência para algum método de estabilização do maciço, mas ao filtrar essas descontinuidades críticas para um dado tipo de ruptura, identificadas nesta análise e, posteriormente o direcionamento para um análise determinística, que emprega parâmetros geométricos e geomecânicos, a tomada de decisão sobre a condição de risco ou não do talude e o nível de urgência para o direcionamento de um dado tipo de contenção pode ser mais assertiva.

As contenções mais recomendadas para os taludes avaliados são direcionadas em função dos blocos oblíquos, onde predomina a condição de deslizamento, cuja a aplicação de concreto projetado ou o atirantamento de telas de aço galvanizado de abertura não muito pequena, estabilizariam o deslizamento ou a queda dos blocos respectivamente. Já o retaludamento não se aplica, pois as descontinuidades mesmo com condições para um dado tipo de ruptura, encontram-se bastante estáveis em termos de resistência ao cisalhamento, mesmo assim, foi possível determinar no trabalho inclinações ideais para remoção ou redução das condições de ruptura.

Conclui-se que um bom mapeamento geológico-geotécnico de taludes, aliado ao emprego de um modelo matemático de ruptura que mais se adequa a condição do estudo, junto da utilização de técnicas experimentais em campo e no laboratório, são as melhores formas de gerar variáveis e dados para realização de análises de estabilidade de taludes em softwares. Essas análises combinadas entre softwares, como foi o caso desse estudo, direcionam para uma melhor interpretação do estado crítico do talude.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, RAFAELA RESENDE. **Caracterização geológica-geotécnica de maciços rochosos marginais à BR 262 entre Pará de Minas e Nova Serrana**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET/MG, Minas Gerais, 2019.
- AYDIN, A. BASU, A. **A method for normalization of Schmidt hammer rebound values**. International journal of rock mechanics and mining sciences, v. 41, n. 7, p. 1211-1214, 2004.
- AYDIN, A. BASU, A. **The Schmidt Hammer in rock material characterization**. Engineering Geology. v. 81, n. 1, p. 1-14, 2005.
- CAPUTO, HOMERO P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. v. 2. São Paulo: LTC, 1988.
- COULOMB, C. A. **Essai sur une application des règles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs à l' architecture**. Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. 7, pp. 343–387, 1776.
- DAVARPANAHD, SEYED MORTEZA et al. **Characterization of Hoek–Brown constant mi of quasi-isotropic intact rock using rigidity index approach**. Acta Geotechnica, v. 17, n. 3, p. 877-902, 2021.
- DNER-ME. ME-093/94. **Solos - determinação da densidade real**. Departamento nacional de estradas e rodagens. p. 04, 1994.
- DEERE, D.U. MILLER, R.P. **Engineering classification and index properties for intact rocks**. 1th ed. New Mexico: Air Force Weapons Lab., 1966.
- FREIRE, LUCIANA MARTINS. LIMA, JOSELITO SANTIAGO. SILVA, JULIANA NOGUEIRA. **Riscos geológicos em áreas urbanas: implicações socioambientais em duas cidades paraenses**. Revista Geoamazônia, v. 6, n. 11, p. 273-292, 2018.
- FIORI, ALBERTO. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- FOSSEN, HAAKON. **Geologia estrutural**. Haakon Fossen, tradução: Fábio R. D. de Andrade. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- GERSCOVICH, DENISE. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to Rock Mechanics**. 2th ed. Canada: John Wiley & Sons, 1989.
- GOODMAN, R. E.; BRAY, J. W. **Toppling of rock slopes. In: Proceedings of the specialty conference rock engineering for foundations and slopes**. Boulder, CO: American Society of Civil Engineers, p. 201-234, 1976.

HOEK, EVERT. 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, 2018.

HOEK, E. CARTER, T. G.; DIEDERICHS, M. S. **Quantification of the geological strength index chart**. In: 47th US rock mechanics/geomechanics symposium. OnePetro, 2013.

HOEK, EVERT et. al. **Hoek-Brown failure criterion-2002 edition**. Proceedings of NARMS-Tac, v. 1, n. 1, p. 267-273, 2002.

HUDSON, JOHN. HARRISON, JOHN. **Engineering rock mechanics: an introduction to the principles**. 1th ed. Oxford: Elsevier Science ltd, 1997.

ISRM. **Suggested methods for the quantitative description of discontinuities**. Pergamon Press ltd. v. 15, p. 319-368, 1978.

MARQUES, EDUARDO. VARGAS, EURÍPEDES. **Mecânica das rochas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022.

MAIA, ANTÔNIO FRANCISCO DA COSTA. **Avaliação da estabilidade dos taludes de rocha do corte ferroviário situado no centro da cidade de Crateús/CE pelos métodos RMR, Q-Barton e SMR**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Minas), Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2021.

ROCSCIENCE. **RSData User Guide**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/rsdata/tutorials>. Acesso em 31 de outubro de 2022.

ROCSCIENCE. **Dips User Guide**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/dips/tutorials/tutorials-overview>. Acesso em 31 de outubro de 2022.

ROCSCIENCE. **RocPlane User Guide**. Disponível em: [rocscience.com/help/roplane/tutorials](https://www.rocscience.com/help/roplane/tutorials). Acesso em 31 de outubro de 2022.

ROCSCIENCE. **SWedge User Guide**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/swedge/tutorials>. Acesso em 31 de outubro de 2022.

ROCSCIENCE. **Slide2 User Guide**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials>. Acesso em 31 de outubro de 2022.

ROCSCIENCE. **RocTopple User Guide**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/roctopple/tutorials>. Acesso em 31 de outubro de 2022.

READ, JOHN (ORG.). STACEY, PETER (ORG.). **Guidelines for open pit slope design**. 1th ed. Australia: CSIRO, 2009.

ALMEIDA, AFONSO RODRIGUES et al. **Boa Viagem- SB.24-V-D-III, escala 1:100.000**: nota explicativa integrada com Quixeramobim e Itatira. Serviço Geológico do Brasil, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2008.

SANTOS, TATIANA BARRETO DOS. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SGARBI, GERALDO (ORG.). **Petrografia macroscópica das rochas ígneas, sedimentares e metamórficas**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.

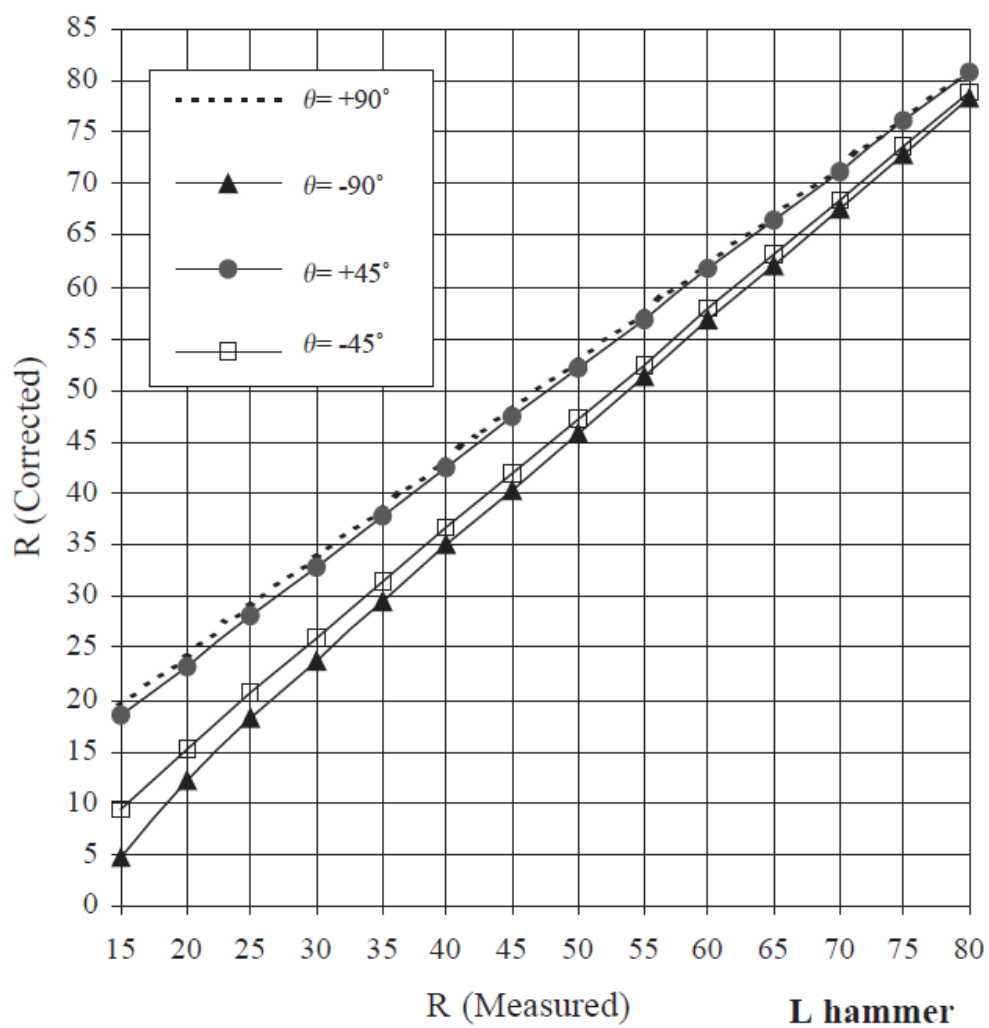
TUCKER, MAURICE. **Rochas sedimentares: guia geológico de campo**. Maurice E. Tucker, tradução: Rualdo Menegat. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

WYLLIE, DUNCAN C. **Rock slope engineering: civil applications**. 5th ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

WINKLER, S. MATTHEWS, J. **Comparison of eletronic and mechanical Schmidt hammers in the context of exposure age dating: Are Q- and R- values interconvertible?** Earth Surface Processes and Landforms. v. 39, n. 8, p. 1128-1136, 2014.

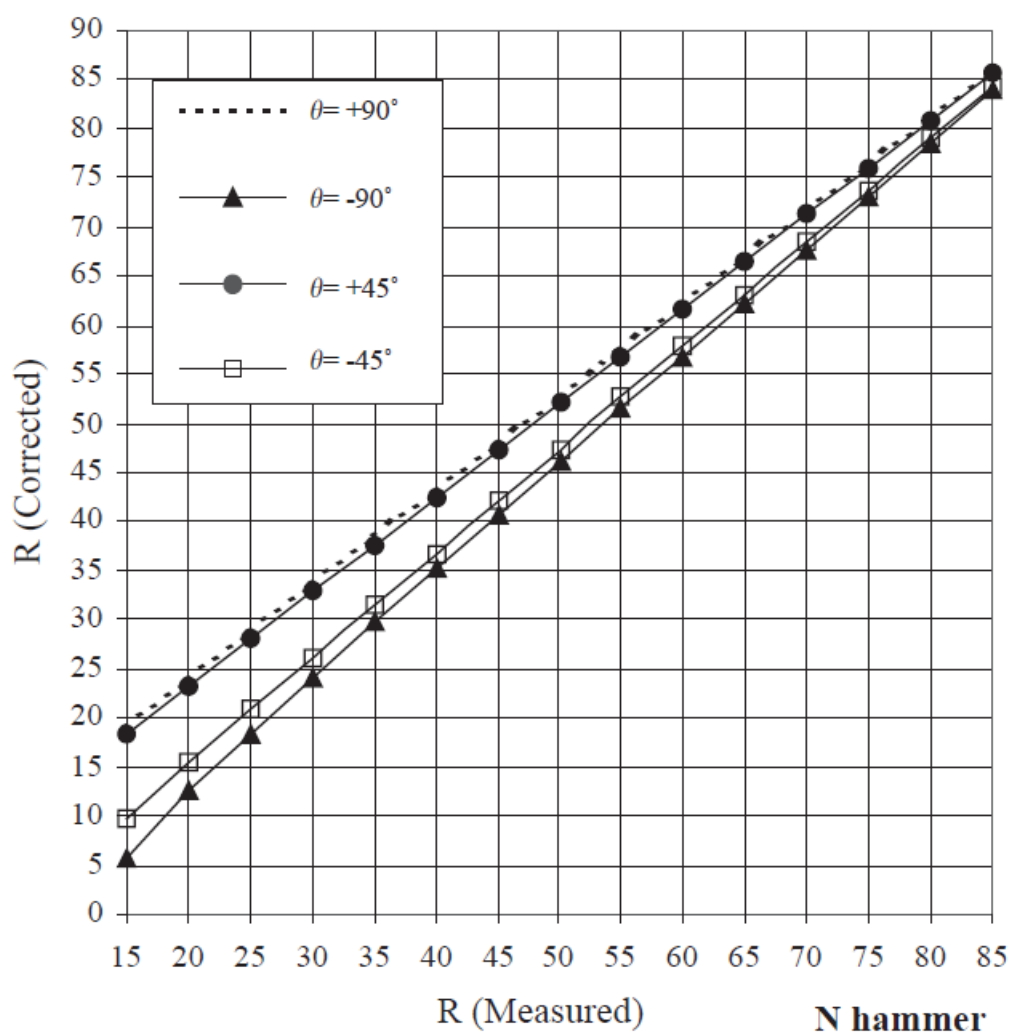
YAGIZ, SAFFET. **Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer**. Bulletin of engineering geology and the environment, v. 68, n. 1, p. 55-63, 2009.

ANEXO A – Correção do rebote para martelos de Schmidt do tipo L



Fonte: Audin; Basu, 2004.

ANEXO B – Correção do rebote para martelos de Schmidt do tipo N



Fonte: Audin; Basu, 2004.

ANEXO C – Valores de m_i para rocha intacta

Rock type	Class	Group	Texture			
			Coarse	Medium	Fine	Very fine
Sedimentary	Clastic		Conglomerate ^a (22 ± 3)	Sandstone (17 ± 4)	Siltstone (7 ± 2)	Claystone (4 ± 2)
			Breccias (19 ± 5)		Greywacke (18 ± 3)	Shales (6 ± 2)
	Non-clastic	Organic	Chalks (7 ± 2)			Marls (7 ± 2)
		Carbonates	Crystalline Limestone (12 ± 3)	Sparitic Limestone (10 ± 2)	Micritic Limestone (9 ± 2)	Dolomites (9 ± 3)
		Evaporites		Gypsum (8 ± 2)	Anhydrite (12 ± 2)	
	Metamorphic	Non-foliated		Marble (9 ± 3)	Homfels (19 ± 4)	Quartzites (20 ± 3)
				Metasandstone (26 ± 6)		
Slightly foliated		Migmatite (29 ± 3)	Amphibolites (26 ± 6)			
Foliated ^b		Gneiss (28 ± 5)	Schists (12 ± 3)	Phyllites (7 ± 3)	Slates (7 ± 4)	
Igneous	Plutonic	Light	Granite (32 ± 2)	Diorite (25 ± 5)		
			Granodiorite (29 ± 3)			
		Dark	Gabbro (27 ± 3)	Dolerite (16 ± 5)		
			Norite (20 ± 5)			
		Hypabyssal	Porphyries (20 ± 5)		Diabase (15 ± 5)	Peridotite (25 ± 5)
		Volcanic	Lava		Rhyolite (25 ± 5)	Dacite (25 ± 3)
				Andesite (25 ± 5)	Basalt (25 ± 5)	
		Pyroclastic	Agglomerate (19 ± 3)	Breccia (19 ± 5)	Tuff (13 ± 5)	

^aConglomerates and breccias may present a wide range of m_i values depending on the nature of the cementing material and the degree of cementation so that they may range from values similar to sandstone to values used for fine-grained sediments

^bThese values are for intact rock specimens tested normal to bedding or foliation. The value of m_i will be significantly different if the failure occurs along a weakness plane

Fonte: Davarpanah *et. al.*, 2021.