

Dissertação de Mestrado

**METODOLOGIAS ANALÍTICAS E MODELAGEM
NUMÉRICA PARA A OTIMIZAÇÃO DA INCLINAÇÃO
DE TALUDES DE MINERAÇÃO COM BASE NO LUCRO.**

AUTORA: RENATA BAZZARELLA CAPELLI

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes (UFOP)

COORIENTADOR: Prof. Dr. Gian Franco Napa García (ITV)

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – NOVEMBRO DE 2018

C238m Capelli, Renata Bazzarella.
Metodologias analíticas e modelagem numérica para a otimização da
inclinação de taludes de mineração com base no lucro [manuscrito] / Renata
Bazzarella Capelli. - 2018.
118f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes.
Coorientador: Prof. Dr. Gian Franco Napa García.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

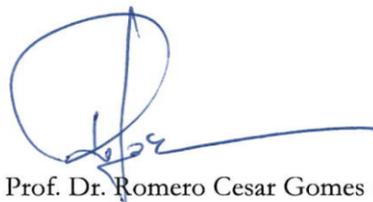
1. Otimização. 2. Risco financeiro. 3. Probabilidade. 4. Modelagem
numérica. 5. Métodos analíticos. I. Gomes, Romero César. II. García, Gian
Franco Napa. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 624.13

METODOLOGIAS ANALÍTICAS E MODELAGEM NUMÉRICA PARA A OTIMIZAÇÃO DA INCLINAÇÃO DE TALUDES DE MINERAÇÃO COM BASE NO LUCRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 1º de novembro de 2018 pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Romero Cesar Gomes (UFOP)



Membro: Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernández (UFOP)



Membro: Prof. Dr. André Pacheco de Assis (UnB)

“Mar calmo nunca fez um bom marinheiro.”

Autor desconhecido.

À minha mãe: Inês Bazzarella.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Romero C. Gomes pela oportunidade e confiança em desenvolver o assunto desta dissertação. Estar no NUGEO trouxe-me um crescimento marcante no âmbito profissional e pessoal.

Ao meu coorientador Gian Franco N. García por seu apoio, ensinamentos, direcionamento, ajuda nos momentos de grandes dificuldades e pela amizade. Sua competência e conhecimento são admiráveis, espero ter correspondido as expectativas quanto à esta pesquisa. Sinto-me honrada em ter conhecido um profissional como você, muito obrigada.

Ao Instituto Tecnológico Vale (ITV) e ao Prof. Vidal F. Navarro Torres por subsidiarem meu mestrado e disponibilizarem seu espaço físico e software para o desenvolvimento desta dissertação. À Isabela Tropa pela disponibilidade durante todo este trabalho. Aos grandes amigos que fiz neste período: Taís, Marina, Leandro e Luciano, que além de acrescentarem com suas experiências reafirmaram que dificilmente avançamos sozinhos.

À minha turma de mestrado e agregados. Obrigada Ana Laura, Eduardo, Maria e Mateus, vocês fizeram das disciplinas atividades enriquecedoras e divertidas. Desesperos à parte, nos viramos muito bem!

À minha família que sempre esteve ao meu lado, independente das minhas escolhas. Ao meu irmão Victor, que do seu jeito, sempre se mostrou preocupado. As minhas irmãs Aline e Lucile por torcerem pelo meu crescimento. Ao meu pai Renato pelos conselhos. Finalmente, à minha guerreira e mãe: Dona Inês, que não mediu esforços para eu alcançar meus objetivos.

Ao meu namorado Marco Antônio (Mutley) por toda paciência e palavras de conforto nos momentos mais árduos. Obrigada por me estimular a ser melhor a cada dia, fico tranquila por ter uma pessoa como você ao meu lado. Os conselhos, a presença e o amor, dedicados a mim, foram essenciais durante esses anos.

À minha família ouropretana sempre presente, desde a graduação. Obrigada irmãs Mandalenses, por aguentarem minhas conversas sobre mestrado, vida, anseios, reclamações e promessas de ficar mais com vocês. Mesmo com toda minha ausência vocês torceram e me apoiaram.

Com o tempo eu pude perceber que os anjos existem e são de carne e osso. Obrigada Elisa, por ser esse anjo. Por destreza do destino você sempre esteve presente nos momentos de transição da minha vida. Vou ser eternamente grata a tudo que você fez e tem feito por mim.

A Deus por continuar provando que as coisas acontecem no momento que têm que acontecer e que no fim, de um jeito ou de outro, tudo dá certo! Enfim, à todas as pessoas que diretamente e indiretamente fizeram parte da minha evolução.

RESUMO

Os desafios associados às análises da estabilidade de taludes de grande porte têm sido crescentes com o avanço da atividade mineradora a céu aberto, principalmente quando a exploração atinge grandes profundidades. Neste cenário, impõe-se, portanto, a adoção de técnicas de análise que assegurem a segurança e a economia das escavações, sem a ocorrência de acidentes e/ou instabilidades nas cavas. Nas últimas décadas, modelos determinísticos foram empregados em larga escala em grandes taludes rochosos de mineração, embora representem um claro distanciamento da realidade do problema pelas incertezas inerentes à variabilidade espacial dos parâmetros geomecânicos adotados. Neste contexto, a evolução das análises para abordagens probabilísticas é bastante natural. A presente pesquisa aplica abordagens probabilísticas para as análises da estabilidade de taludes rochosos de grande porte de uma mina de ferro ainda em operação, visando estabelecer métodos de otimização do ângulo global, de inter-rampa e de banco de uma seção típica da cava. Foram utilizadas duas abordagens objetivando as otimizações: uma por meio de modelagem numérica (com base no programa FLAC^{3D}) e baseada em conceitos de lucro e outra utilizando-se métodos analíticos baseados em valores de referência para os fatores de segurança (FS). Para a quantificação da probabilidade de falha (PF) e dos riscos associados, foram utilizadas simulações de Monte Carlo. Um estudo de sensibilidade foi realizado para se avaliar a influência do custo de falha na função de risco e foi desenvolvido um *software*, denominado ProBench, para solucionar a otimização dos ângulos de inter-rampas e bancos via metodologias analíticas. Na otimização do ângulo global por simulações numéricas, foi gerada uma superfície de resposta polinomial linear com intuito de se aliviar a carga computacional exigida pelo acoplamento direto das simulações de Monte Carlo. A configuração ótima encontrada para o ângulo global do caso estudado variou, de acordo com os valores dos custos de falha utilizados, entre 31° e 34,5°. Os ângulos ótimos para inter-rampa e banco foram, respectivamente, da ordem de 40° e 47°. Essas geometrias mostraram-se consistentes com a prática observada na mina em estudo e ratificaram o potencial das metodologias aplicadas de forma que estudos de quantificação do risco e do lucro em projetos ótimos de escavação mostram-se possíveis e eficientes no âmbito da prática geotécnica de taludes de mineração.

Palavras-chave: otimização, risco financeiro, probabilidade, modelagem numérica, métodos analíticos.

ABSTRACT

The challenges related with stability analyses of large slopes has been increasing as response of open sky mining activities, especially when it look into great depths. In this sense, it is therefore necessary the adoption of analysis techniques that ensure safety and economy of excavations, whereas without the occurrence of accidents and/or instabilities in the caves. Although deterministic models were employed in a large scale on large rock mining embankments in the last decades, they represent a clear distance from the problem core for the inherent uncertainties of spatial variability on geomechanical parameters adopted. In this context, the evolution of analytics for probabilistic approaches is assertively natural. The present study apply those probabilistic approaches to stability analyses of a large rock slope in an iron mine that still operates, aiming to stablish methods of optimization of the (i) global, (ii) inter-ramp, and (iii) bank angles of a typical section cave. Were used two approaches as optimizations: the first was based on numerical optimizations (program FLAC^{3D} based) and in profit concept; in the second analysis was used analytical methods based on reference values for safety factors (FS). Monte Carlo simulation was utilized to quantify the fail probability (Pf) and associated risks. A sensibility study was realized to evaluate the influence of cost of failure in the risk function. A software, named ProBench, was developed to solve the optimization of inter-ramp and banks angles via analytic methods. In the global angle optimization, by numerical simulations, was generated a surface of polynomial linear output in order to alleviate the computational load required by the direct coupling of the Monte Carlo simulations. The optimal configuration found for the global angle of the case studied varied, as a direct answer to the values of the failure cost used, between 31° and 34,5°. The optimal angles for the inter-ramp and bank were 40° and 47°, respectively. These geometries were consistent with the practice observed in the mine under study and ratified the potential of the applied methodologies. Then, the studies of risk quantification and profit in optimal excavation projects are possible and efficient in the scope of geotechnical practice of slopes mining.

Key-words: optimization, financial risk, probability, numerical modeling, analytical methods.

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

α_i -	Direção de mergulho entre dois planos;
α_f -	Direção de mergulho da face do talude;
α_p -	Direção de mergulho do plano de deslizamento;
β 's -	Coefficientes do modelo de regressão;
\emptyset -	Ângulo de atrito da junta;
\emptyset_b -	Ângulo de atrito básico;
\emptyset_r -	Ângulo de atrito residual;
\emptyset_d -	Ângulo de atrito solicitante;
\emptyset_t -	Ângulo de atrito equivalente;
ψ_f -	Mergulho da face do talude;
ψ_p -	Mergulho do plano de deslizamento;
ψ_i -	Mergulho da interseção das descontinuidades no plano perpendicular a face do talude Mergulho do plano de deslizamento;
ψ_s -	Mergulho do plano topo do talude;
γ_r -	Peso específico da rocha;
γ_w -	Peso específico da água;
σ_n -	Tensão normal ao plano;
b -	Distância horizontal da crista do talude até a fenda de tração, quando existente, ou até a saída da junta.
c -	Coesão;
c_t -	Coesão equivalente;
C_f -	Custo de falha;
D -	Constante referente a qualidade do desmonte;
m_i -	Constante da rocha intacta;
E_i -	Módulo de Young;
P_f -	Probabilidade de falha;
U -	Força neutra ou de levantamento atuante na base do bloco de rocha;
V -	Força horizontal devida à água na fenda de tração;

x_k -	Variáveis independentes ou regressoras;
Y -	Variável dependente;
z -	Profundidade da fenda de tração;
z_w -	Altura da água na fenda de tração;
W -	Peso do bloco deslizante;
Y_w -	Distância entre o ponto médio e o nível da água;
GSI -	Índice de Qualidade Geológica;
JRC -	Coefficiente de rugosidade da junta;
JCS -	Resistência a compressão da parede da junta;
FS -	Fator de segurança;
FOMV -	First Order Mean Value / Primeira Ordem no Valor Médio;
FOSM -	First Order Second Moment / Primeira Ordem Segundo Momento;
FORM -	First Order Reliability Method / Método de Confiabilidade de Primeira Ordem;

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	15
INTRODUÇÃO.....	15
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA.....	15
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
CAPÍTULO 2.....	19
TALUDES DE MINERAÇÃO: CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL.....	19
2.1. PROJETO GEOMÉTRICO DE CAVAS A CÉU ABERTO.....	19
2.2. MEIOS DE PROPAGAÇÃO DE RUPTURAS EM MACIÇOS ROCHOSOS	20
2.3. MODOS DE RUPTURAS DE TALUDES ROCHOSOS.....	21
2.3.1. Ruptura planar.....	22
2.3.2. Ruptura em cunha.....	26
2.3.3. Tombamento.....	31
2.4. CRITÉRIOS DE RUPTURA.....	32
2.4.1. Mohr-Coulomb (MC).....	33
2.4.2. Barton-Bandis (BB).....	35
2.4.3. Hoek-Brown (HB).....	36
2.5. ABORDAGENS PARA ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	38
2.5.1. Métodos analíticos.....	39
2.5.2. Métodos numéricos.....	40
2.5.3. Incertezas em geotecnia.....	42
2.5.4. Abordagem probabilística.....	44
2.5.5. Análise e gestão de riscos.....	47
CAPÍTULO 3.....	49
ANÁLISE DA ESTABILIDADE OTIMIZADA DE TALUDES DE MINERAÇÃO.....	49

3.1.	CONCEPÇÃO E CRITÉRIOS DE PROJETO	49
3.2.	ABORDAGEM NUMÉRICA.....	50
3.2.1.	Modelo de blocos da mina estudada	51
3.2.2.	Consolidação da base de dados.....	54
3.2.3.	Superfície de resposta	59
3.2.4.	Análise probabilística e otimização	61
3.3.	ABORDAGEM ANALÍTICA	62
3.3.1.	Entrada e saída de dados	64
3.3.2.	Modos de ruptura	65
3.3.3.	Otimização e análise probabilística	66
	CAPÍTULO 4.....	67
	ANÁLISE DA ESTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GLOBAL DO TALUDE	67
4.1.	ROTINAS IMPLEMENTADAS	67
4.2.	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
	CAPÍTULO 5.....	82
	ANÁLISE DA ESTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE FACE DE INTER-RAMPAS E BANCOS	82
5.1.	ROTINAS IMPLEMENTADAS	82
5.2.	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROBENCH	84
5.3.	PARÂMETROS DE ENTRADA DA MINA ESTUDADA	86
5.4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	87
	CAPÍTULO 6.....	91
	CONCLUSÕES E PESQUISAS COMPLEMENTARES.....	91
6.1.	CONCLUSÕES.....	91
6.2.	PESQUISAS COMPLEMENTARES.....	93
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

APÊNDICE I: Tutorial de utilização do ProBench	98
APÊNDICE II: Parâmetros gerados no FLAC ^{3D} e utilizados para obtenção do meta-modelo	104
APÊNDICE III: Arquivos de entrada e de saída do ProBench para sua validação	107
APÊNDICE IV: Arquivos de entrada e de saída do ProBench utilizados para a otimização da seção da mina de estudo.....	110
ANEXO I: Resultados gráficos do RocPlane e do Swedge para calibração do ProBench	113
ANEXO II: Resultados gráficos do Dips para análise cinemática limite de tombamento e validação pelo ProBench	117

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVAS DA PESQUISA

Segundo Ahmadabadi e Poisel (2015), os solos e as rochas constituem materiais com grande variabilidade espacial, e estas características impõem graus elevados de incertezas nas análises de obras geotécnicas. Assim, maciços rochosos tendem a apresentar zonas com características geomecânicas muito distintas e heterogêneas, que são funções da escala dos problemas analisados, com impacto relevante no comportamento global destas estruturas.

Taludes de mineração de grande porte se enquadram tipicamente nestas condições. Sendo assim, para abordar as incertezas dos materiais geotécnicos o acoplamento de modelos mecânicos e abordagens probabilísticas tem despertado muito interesse na literatura dos últimos 30 anos, levando a uma consolidação de boas práticas geotécnicas e uma caracterização das propriedades dos maciços mais refinada. Essas práticas geotécnicas avançadas contribuem para concepções de projetos mais elaborados, construídos e operados de modo mais seguro e com um aproveitamento econômico mais eficiente.

O avanço da atividade mineradora tornou os desafios das análises da estabilidade de taludes ainda mais ousados, especialmente quando a exploração atinge grandes profundidades. Portanto, há uma crescente necessidade de metodologias que garantam que essa escavação seja segura e econômica ao mesmo tempo. Do ponto de vista geotécnico, a estabilidade de taludes constitui uma ferramenta essencial na definição final das geometrias da cava.

Nas últimas décadas, os métodos analíticos e numéricos têm sido utilizados de maneira determinística para realizar previsões da segurança de taludes. Os parâmetros de entrada são usados nos modelos, fornecendo um resultado único, sendo considerados uma

previsão de desempenho razoável da realidade. Suportar tal suposição constitui um distanciamento da realidade na caracterização de maciços, com base na reconhecida incerteza dos parâmetros geomecânicos adotados. Neste contexto, a evolução da abordagem determinística para uma abordagem probabilística é bastante natural, de forma a se quantificar as origens das incertezas geotécnicas e para estudar os seus efeitos na confiabilidade da estabilidade dos taludes (Costa, 2005).

Basicamente os métodos analíticos e numéricos são baseados, respectivamente, em estados de equilíbrio limite e em estados de tensão/deformação. O primeiro prevê a possibilidade de ruptura através do estudo das forças que atuam ao longo de uma superfície potencial de ruptura, sendo essa a solução mais fácil e mais difundida. O segundo incrementa outros comportamentos para se avaliar o estado limite desse talude. A incorporação de comportamentos tensão/deformação, deslocamentos, fator tempo e tensões confinantes, torna a análise mais completa, precisa e, conseqüentemente, mais complexa (Assis, 2003).

Por outro lado, a necessidade de avaliar taludes cada vez mais elevados, tem tornado crescente a utilização dos métodos numéricos. A modelagem numérica, pode então confrontar os engenheiros com modelos complexos onde se tem muitas variáveis de projeto envolvidas. Geralmente o método numérico requer um grande número de avaliações das funções computacionalmente envolvidas nas relações entrada-saída e para análises probabilísticas. Para resolver esta dificuldade, a meta-modelagem tem sido amplamente empregada como uma técnica de redução do esforço computacional. Essa metodologia, baseada na geração de uma superfície de resposta, consiste em substituir a resposta complexa de estruturas por modelos de baixa ordem capazes de representar adequadamente a relação entrada-saída (Montgomery e Runger, 2003).

Na mineração a céu aberto, o projeto do talude ótimo geralmente está associado à maximização do ângulo de taludes global e à minimização da extração de estéril. Concomitantemente, tal projeto deve garantir a estabilidade global do talude, provendo a movimentação segura e efetiva de pessoal, equipamento e materiais durante as operações mineiras (Wyllie e Mah, 2004).

O presente trabalho de pesquisa se insere neste contexto, mediante a análise do comportamento de um maciço rochoso de uma mina a céu aberto ainda em operação, localizada no estado de Minas Gerais (Brasil), compreendendo duas abordagens: análises numéricas do problema assumindo o meio como contínuo e utilização de metodologias analíticas, assumindo que o maciço é um meio descontínuo. A classificação dos maciços, bem como alguns parâmetros geomecânicos, quando não informados pela empresa proprietária da mina, foram estimados.

A pesquisa inclui também a abordagem das potencialidades da aplicação da modelagem numérica, em uma seção 2D, aliada a técnicas de otimização baseadas no lucro, bem como a proposição de um *software* para aplicação de métodos analíticos, aliado a técnicas de otimização, baseadas no fator de segurança.

1.2. OBJETIVOS

A partir dessas considerações iniciais e deste escopo sintético de abordagens, o estudo tem como objetivo geral otimizar o ângulo de face dos taludes de uma seção 2D de uma mina a céu aberto (estudo de caso), avaliando a sua estabilidade mecânica e buscando um maior aproveitamento econômico da reserva. Nesse contexto, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Selecionar uma seção 2D de um modelo geomecânico 3D e aplicar tecnologias para geração de um meta-modelo usando modelagem numérica via FLAC^{3D};
- Utilizar metodologias determinísticas e probabilísticas para abranger resultados de estabilidade, risco financeiro e, conseqüentemente, dos impactos financeiros e dos lucros associados a um dado talude global.

Criar um *software* para analisar três modos de ruptura em maciços rochosos simultaneamente, utilizando métodos analíticos. Suas análises serão realizadas deterministicamente e probabilisticamente, concluindo com a otimização da inclinação das estruturas de menor escala (inter-rampa e banco).

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está organizada em seis capítulos, descritos aqui brevemente. Neste capítulo, intitulado ‘Introdução’ (Capítulo 1), apresentam-se as considerações iniciais do tema objeto da pesquisa, as justificativas, objetivos e a própria organização da dissertação.

O Capítulo 2, denominado ‘Taludes de mineração’, apresenta de maneira sintética os conceitos mais importantes sobre taludes rochosos no âmbito da mineração. Os fundamentos teóricos são abordados para fornecer embasamentos relativos aos temas: projetos geométricos, estabilidade em maciços rochosos, confiabilidade, risco, modelagem numérica e probabilidade.

O capítulo 3 – ‘Análise da estabilidade otimizada de taludes de mineração’, descreve as abordagens de estudo utilizadas no maciço rochoso do estudo de caso investigado nesta dissertação, incluindo as técnicas de modelagem numérica e de abordagens analíticas. Os procedimentos para otimizar as inclinações da face do talude também são abordados nesse capítulo.

O capítulo 4, denominado ‘Análise da estabilidade e otimização do ângulo global do talude’, tem o foco de aprofundar os princípios da metodologia utilizada para a modelagem numérica e a otimização do ângulo global dos taludes da mina; são abordados os resultados e as discussões principais em relação ao procedimento utilizado.

O capítulo 5 – ‘Análise da estabilidade e otimização do ângulo de face de inter-rampas e bancos’ apresenta as rotinas utilizadas para a abordagem analítica; são detalhados os princípios gerais do *software* proposto - *ProBench*, para resolver a otimização da inclinação de taludes em escalas menores. Nesse capítulo, também apresentam-se os resultados e as discussões a respeito dos métodos utilizados.

Por fim, o capítulo 6 – ‘Conclusões e pesquisas complementares’ apresenta uma síntese das principais conclusões do trabalho, bem como de algumas sugestões para pesquisas futuras.

TALUDES DE MINERAÇÃO: CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

2.1. PROJETO GEOMÉTRICO DE CAVAS A CÉU ABERTO

O projeto geométrico de uma cava a céu aberto (Figura 2.1) objetiva fornecer configurações que garantam segurança e retorno financeiro ao empreendimento. O processo começa com a proposta de dividir o modelo em domínios geotécnicos que contenham áreas com características geológicas, estruturais e materiais similares. Isso facilitará a determinação de potenciais modos de falha em suas respectivas escalas (banco, inter-rampa e global).

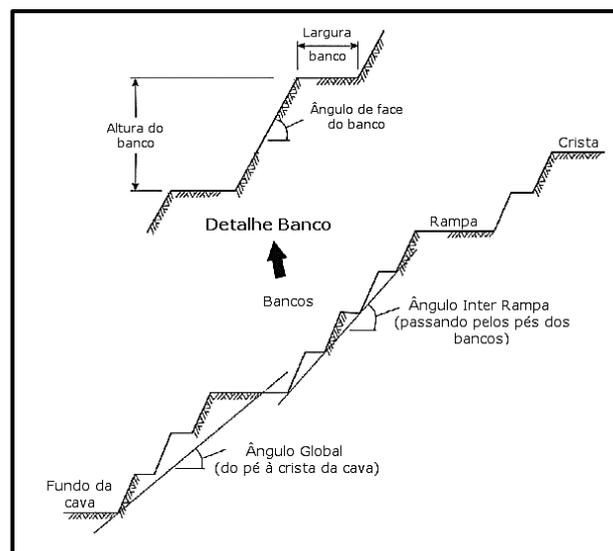


Figura 2.1 – Geometria típica de uma cava de mineração (Read e Stacey, 2009, modif.).

As combinações de bancos fornecem a inclinação da inter-rampa. Os ângulos inter-rampa são normalmente fornecidos aos planejadores de minas como os critérios básicos de projeto de inclinação. Somente quando as rampas forem adicionadas, o ângulo de inclinação geral se torna aparente. Assim, para o trabalho inicial de projeto e avaliação da mina, um ângulo de inclinação geral envolvendo o ângulo entre rampas, diminuído por 2-3° pode ser utilizado para iniciar as análises de estabilidade (Read e Stacey, 2009).

Ainda segundo Read e Stacey (2009), o processo é muitas vezes iterativo, envolvendo os planejadores de mina e a equipe de geotecnia. O tipo de análise é largamente ditado pelo modo de falha provável, a escala da inclinação, dados disponíveis e o nível do projeto.

Em taludes de mina em maciço rochoso fraturado, geralmente os métodos analíticos lidam com taludes de menor escala, onde as rupturas são estruturalmente controladas por planos de fraqueza, por exemplo, por juntas e foliações. Por outro lado, os métodos numéricos lidam com estruturas em grande escala analisando o comportamento do maciço rochoso como um todo.

2.2. MEIOS DE PROPAGAÇÃO DE RUPTURAS EM MACIÇOS ROCHOSOS

Segundo Hoek (2002), dependendo da escala relativa entre à superfície de escorregamento e das estruturas geológicas presentes em um maciço rochoso, que é realizada a seleção do método apropriado de obtenção da resistência de um talude. A classificação do tipo rochoso a se tratar, torna-se crucial para a assertividade nas análises. Logo, três classes de rochas podem ser observadas a seguir:

- Rocha intacta: é a parte do material livre de descontinuidades predominantes. Os modelos com critério de resistência de Hoek-Brown e de Mohr-Coulomb são os mais utilizados para representar o seu comportamento mecânico;
- Descontinuidades: As questões de instabilidade em taludes rochosos são diretamente governadas pelas características das famílias de descontinuidades. Portanto, a superfície de ruptura tende a seguir as descontinuidades, não ocorrendo através da rocha intacta, a não ser que a rocha seja muito fraca. Os modelos mais apropriados para representar o comportamento mecânico das descontinuidades são: Mohr-Coulomb e Barton-Bandis;
- Maciço rochoso: Sabe-se que o maciço rochoso é composto por rocha intacta e descontinuidades. Sua resistência é significativamente reduzida com o acréscimo do tamanho da amostra e, conseqüentemente, com o acréscimo do número de

descontinuidades. O modelo mais utilizado para representar o seu comportamento mecânico é o de Hoek-Brown.

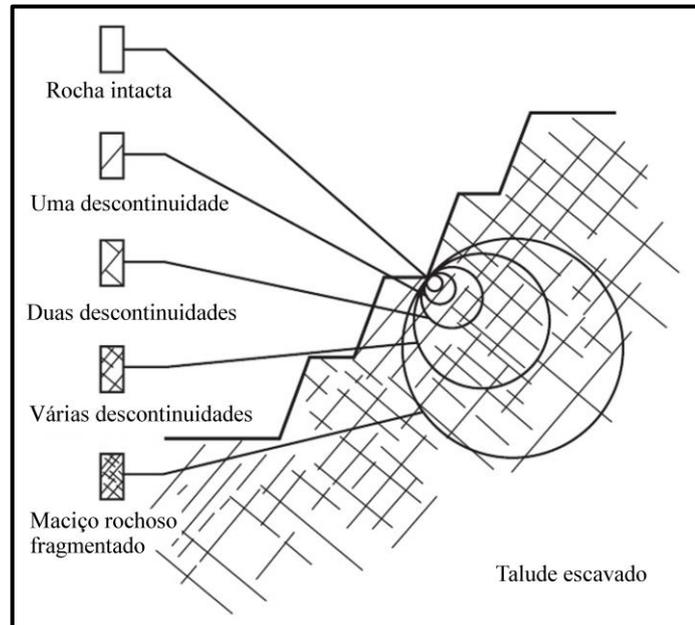


Figura 2.2 – Influência da escala em maciços rochosos (Wyllie e Mah, 2004)

Baseado nos efeitos escala e nas condições geológicas mencionados previamente, a escolha do método de estudo apropriado da resistência da estrutura pode ser feita. De acordo com a Figura 2.2, onde as escalas e a influência das descontinuidades são representadas, pode-se observar que a pequena escala propicia a utilização da resistência da rocha intacta em avaliações, por exemplo, de perfuração e desmonte de rochas. Já ao nível de bancada, a longitude das descontinuidades sendo igual à altura de bancada, pode-se usar à resistência das descontinuidades para as análises de estabilidade. Continuando a avaliação e já em uma dimensão que engloba o talude como um todo, sendo o mesmo muito maior que a longitude das descontinuidades, cabe avaliar a estabilidade pelo estudo da resistência ao cisalhamento do maciço rochoso.

2.3. MODOS DE RUPTURAS DE TALUDES ROCHOSOS

A estabilidade de taludes em maciços rochosos está condicionada a existência e a resistência dos planos de descontinuidades. Para rochas resistentes, porém muito fraturadas, existem várias possibilidades para o movimento do bloco ao longo dos planos

de fraqueza. Esses vários conjuntos de planos de descontinuidade que se cruzam em ângulos oblíquos, os estudos com o modelo cinemático podem ser úteis para antecipar o padrão mais provável de falha da inclinação (Goodman, 1989).

Os modos básicos de ruptura, envolvendo o movimento de blocos de rocha em descontinuidades, são: deslizamento planar (Figura 2.3 (a)), deslizamento em cunha (Figura 2.3 (b)) e tombamento (Figura 2.3 (c)).

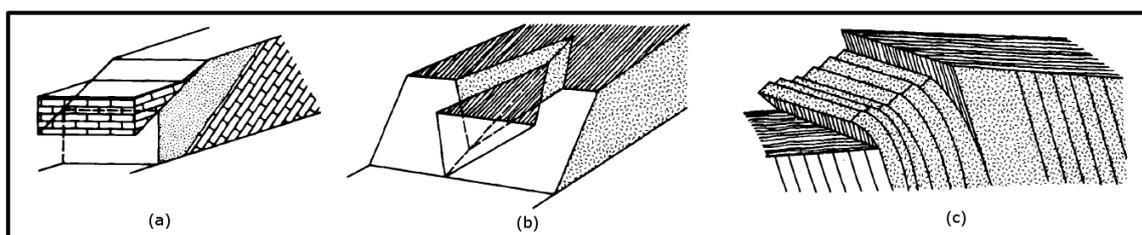


Figura 2.3 – Modos de ruptura de taludes rochosos. (a) Deslizamento planar. (b) Deslizamento em cunha. (c) Tombamento (Goodman, 1989)

Os modos básicos de ruptura condicionado especialmente por descontinuidades e as análises de estabilidade de taludes finitos, a seguir, são baseados em Hoek e Bray (1981), Goodman (1989), Wyllie e Mah (2004) e Fiori (2016).

2.3.1. Ruptura planar

Segundo Wyllie e Mah (2004) Considera-se uma superfície com condições cinemáticas para uma ruptura plana: um escorregamento de um único bloco, conformado por uma descontinuidade cuja a direção de mergulho é aproximadamente paralela à direção da face do talude, ou seja, dentro de um intervalo de $\pm 20^\circ$. Outra condição é o mergulho da descontinuidade ser menor que o mergulho do talude e maior que o ângulo de atrito deste plano. Uma das premissas é que a descontinuidade passe pelo pé do talude, ou acima do pé, e intercepte a face superior do mesmo ou termine em uma fenda de tração (Figura 2.4 (a)). Considera-se também que o bloco está desconfinado lateralmente por duas descontinuidades perpendiculares a face do talude com resistência ao cisalhamento desprezível, o que permite o seu livre escorregamento (Figura 2.4 (b)).

A fenda de tração, considerada vertical, pode ou não estar preenchida com água. A sua existência permite a entrada da água até sair no sopé do talude, passando pelo plano de escorregamento, como pode ser observado na Figura 2.5. A fenda de tração também pode estar localizada na face do talude, porém esse caso não será abordado nesta dissertação.

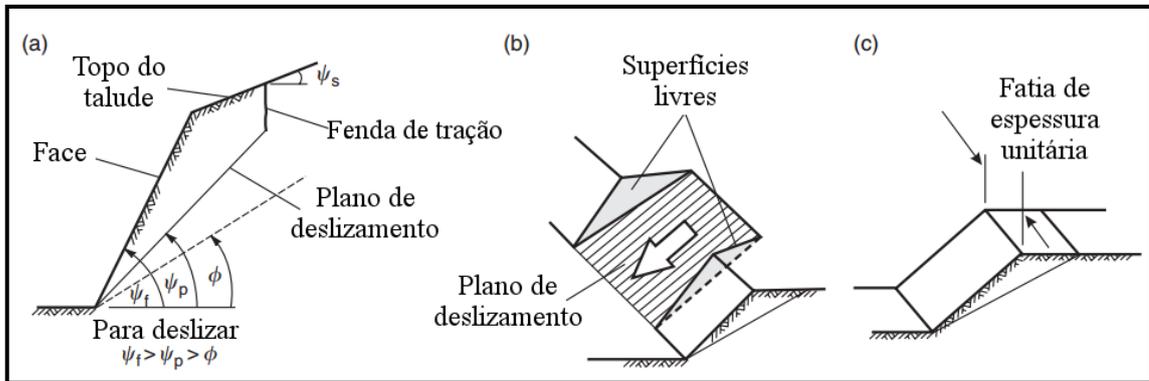


Figura 2.4 – Geometria do talude exibindo o plano de falha: (a) seção transversal; (b) superfícies laterais livres; (c) fatia de espessura unitária (Wyllie e Mah, 2004)

A distância horizontal ‘b’ é medida da crista do talude até a fenda de tração (Figura 2.5) ou até o afloramento da junta na parte superior do talude.

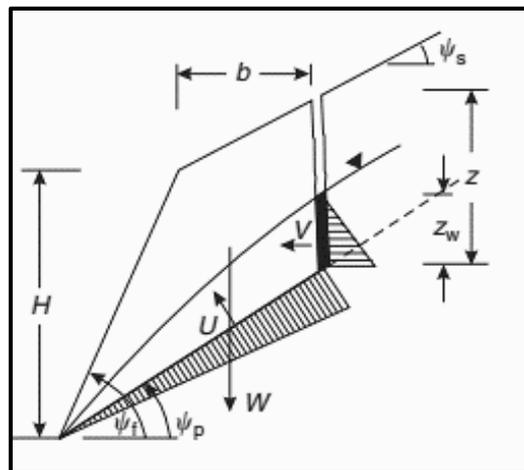


Figura 2.5 – Talude com fenda de tração no topo e detalhamento das forças U e V resultantes da pressão da água (adaptado - Wyllie e Mah, 2004)

Quando não há fenda de tração, a equação (2.1) poderá representar o valor de ‘b’:

$$b = (H - z) \cot \psi_p - H \cot \psi_f \quad (2.1)$$

As forças causadas pela presença de água na fenda e na descontinuidade (Figura 2.5) são denominadas força horizontal (V) e é devida à água na fenda de tração e força neutra ou de levantamento (U) que é atuante na base do bloco de rocha.

A profundidade da fenda (z) pode ser adquirida a partir da seguinte equação:

$$z = H - \left(b + H \cot \psi_f \right) \tan \psi_p + b \tan \psi_s \quad (2.2)$$

Em análises bidimensionais de taludes, é usual considerar a dimensão perpendicular à seção do talude como unitária. Sendo assim, a área da superfície de escorregamento é o comprimento da superfície na seção multiplicado pela unidade, e o volume do bloco é a área do bloco na seção do talude multiplicada pela unidade (Figura 2.4 (c)).

O fator de segurança (FS) para a ruptura planar é calculado pela resultante de todas as forças que atuam no talude, pelas suas componentes paralelas e normais ao plano deslizando. O FS seguindo o critério de resistência, por exemplo de Mohr-Coulomb, pode ser expresso:

$$FS = \frac{\text{Forças resistentes}}{\text{Forças atuantes}} = \frac{cA + \sum N \tan \phi}{\sum S} \quad (2.3)$$

sendo c a coesão, A a área do plano deslizando, N a componente normal ao plano, ϕ o ângulo de atrito e S a componente paralela ao plano.

Baseada na equação (2.3), o fator de segurança para as configurações do talude representado na Figura 2.5 pode ser reescrito:

$$FS = \frac{cA + \left(W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p \right) \tan \phi}{W \sin \psi_p + V \cos \psi_p} \quad (2.4)$$

A área do plano deslizante e a força horizontal, devida à água na fenda de tração, são obtidas respectivamente, através:

$$A = (H + b \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2.5)$$

$$V = \frac{1}{2} \gamma_w z_w^2 \quad (2.6)$$

sendo γ_w o peso específico da água e z_w a altura da água na fenda de tração.

Caso a junta tenha uma altura (h), ou seja, aflore acima do pé do talude, como pode ser observado na Figura 2.3 (a), o valor de 'h' deverá ser subtraído na equação (2.5). Sendo assim, para o cálculo da área da superfície da junta a equação (2.7) deverá ser utilizada:

$$A = (H - h + b \tan \psi_s - z) \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2.7)$$

Ainda na equação (2.4), ψ_p é o mergulho do plano deslizante, ϕ é o ângulo de atrito do plano deslizante. O peso do bloco deslizante (W) pode ser obtido como:

$$W = \gamma_r \left[\left(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p \right) \left(b(H - h) + \frac{1}{2} (H - h)^2 \cot \psi_f \right) + \frac{1}{2} b^2 \left(\tan \psi_s - \tan \psi_p \right) \right] \quad (2.8)$$

sendo γ_r o peso específico da rocha e ψ_s o mergulho do plano topo do talude (Figura 2.5).

De acordo com Fiori (2016), a formulação para a força de subpressão dependerá do caso a ser estudado, que podem ser esses:

- Talude sem fenda de tração:

$$U = \frac{1}{4} \gamma_w H_w^2 \operatorname{cosec} \psi_p \quad (2.9)$$

Considerando a distância entre o ponto médio e o nível de água (Y_w) é igual a $\frac{H_w}{2}$.

- Talude com água abaixo da fenda de tração:

$$U = \frac{Y_w \gamma_w}{2} \left(\frac{H_w}{\sin \psi_p} \right) \quad (2.10)$$

- Talude com fenda de tração posicionada no topo:

$$U = \frac{\gamma_w}{2 \sin \psi_p} \left[H_w^2 \left(1 - \cot \psi_f \tan \psi_p \right) - (H_w + Z_0 - (H - h))^2 \right] \quad (2.11)$$

Quando o nível de água estiver abaixo do fundo da fenda de tração, o termo $(H_w + Z_0 - (H - h))$ será desconsiderado, pois o mesmo possui valor negativo.

- Talude com o plano de topo inclinado e fenda de tração:

$$U = \frac{\gamma_w Z_w \left((H - h) + b \tan \psi_s - Z_0 \right) \operatorname{cosec} \psi_p}{2} \quad (2.12)$$

2.3.2. Ruptura em cunha

Ainda, segundo Wyllie e Mah (2004), a ruptura em cunha, diferente da planar, é avaliada quando descontinuidades estão obliquamente a face do talude e o deslizamento do bloco de rocha ocorre ao longo da linha de interseção de dois desses planos. A análise cinética para um possível deslizamento é realizada através de informações sobre os planos e o talude, podendo ser avaliada em sua respectiva representação estereográfica (Figura 2.6), onde se assume que o ângulo de atrito é igual nos dois planos.

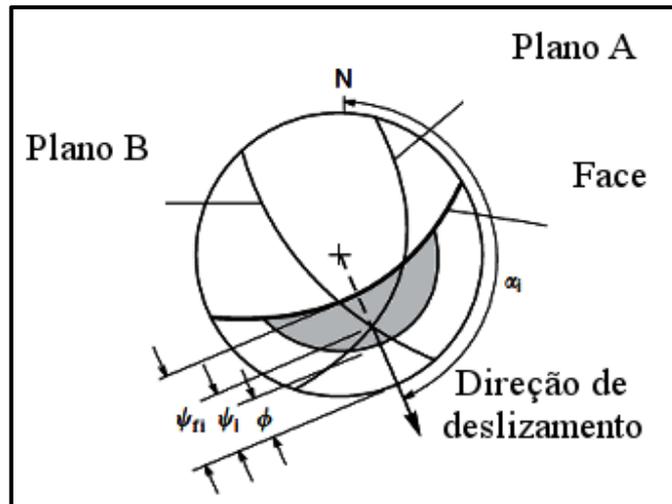


Figura 2.6 – Estereograma indicando os dois planos (A e B), a interseção entre eles e uma situação viável para a falha (adaptado - Wyllie e Mah (2004)).

Para que ocorra uma análise cinética favorável a ruptura, algumas condições deverão ser satisfeitas:

- Dois planos irão se cruzar, formando uma linha de interseção;
- O mergulho da interseção (ψ_i) deverá ser maior que o ângulo de atrito (ϕ) dos planos e menor que o mergulho da face do talude (ψ_f) como na Figura 2.7;

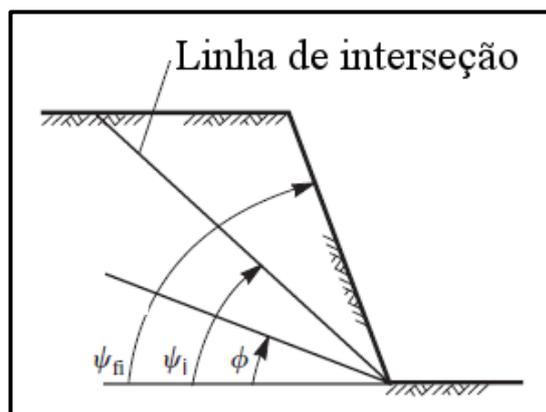


Figura 2.7 – Inclinações no plano perpendicular ao mergulho do talude (adaptado - Wyllie e Mah (2004)).

- A direção de mergulho da interseção (α_i) deve estar dentro de um intervalo a partir da direção de mergulho da face do talude (Figura 2.8).

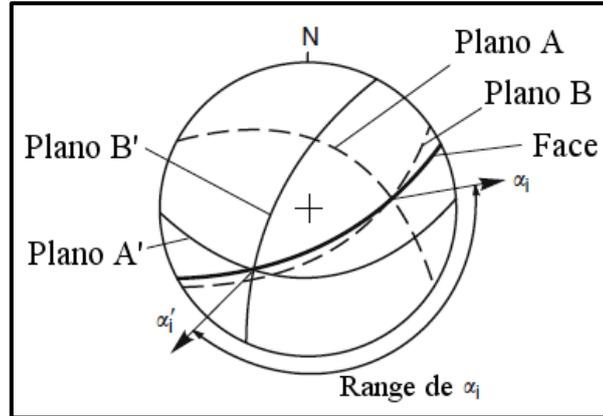


Figura 2.8 – Estereograma dos limites da direção de mergulho da interseção, para que o deslizamento seja possível (adaptado - Wyllie e Mah, 2004).

O mergulho (ψ_i) e a direção de mergulho (α_i) da interseção entre dois planos (A e B), podem ser calculados a partir das equações a seguir:

$$\psi_i = \tan \psi_A \cos(\alpha_A - \alpha_i) = \tan \psi_B \cos(\alpha_B - \alpha_i) \quad (2.13)$$

$$\alpha_i = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \psi_A \cos \alpha_A - \tan \psi_B \cos \alpha_B}{\tan \psi_B \sin \alpha_B - \tan \psi_A \sin \alpha_A} \right) \quad (2.14)$$

sendo α_A e α_B as direções de mergulho e ψ_A e ψ_B os mergulhos dos dois planos.

ψ_i pode ser utilizado diretamente para as análises cinemáticas, caso α_i seja igual a direção de mergulho do talude (Figura 2.7). Caso contrário, deve-se calcular a projeção de ψ_i ($P\psi_i$) sobre o plano perpendicular à direção de mergulho do talude, expresso pela realção:

$$P\psi_i = \text{atan} \left(\frac{\tan \psi_i}{\cos(\alpha_i - \alpha_f)} \right) \quad (2.15)$$

sendo α_f a direção de mergulho do talude.

Para o cálculo do fator de segurança da cunha, é necessário mais do que analisar as condições geométricas da análise cinemática. É também necessário analisar as dimensões da cunha, coesão, ângulo de atrito e a pressão provocada pela presença de água.

A Figura 2.9 (a) representa um maciço com coesão nos planos A e B (c_A e c_B), ângulos de atrito diferentes nesses planos (ϕ_A e ϕ_B) e uma distribuição das pressões de água.

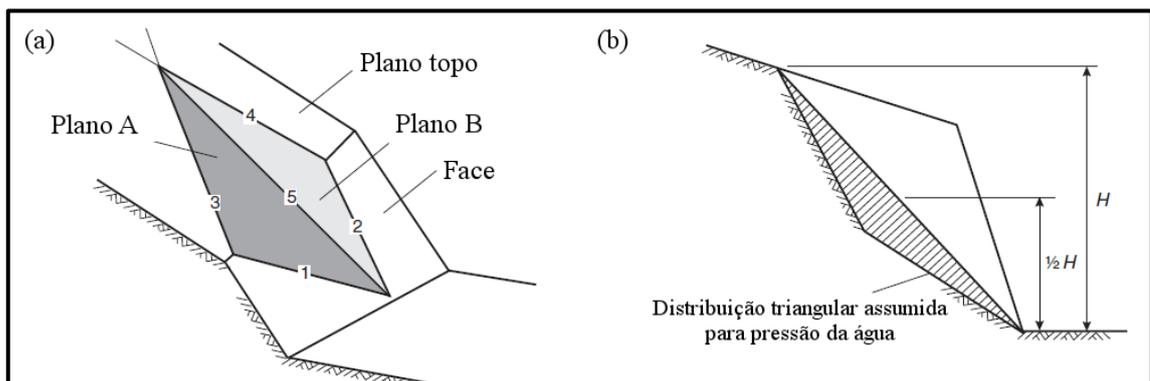


Figura 2.9 – Elementos geométricos para a análise de escorregamento de uma cunha (adaptado - Wyllie e Mah, 2004)

O máximo da força de subpressões é representada por uma distribuição de pressão triangular com o valor máximo que ocorre na altura média ao longo da linha de interseção 5 (Figura 2.9b) e é igual a zero ao longo das linhas 1, 2, 3 e 4 (Fiori, 2016), sendo as linhas de interseção, dos planos envolvidos, as seguintes:

- Linha 1: Interseção do plano A com a face da vertente.
- Linha 2: Interseção do plano B com a face da vertente.
- Linha 3: Interseção do plano A com a face superior da vertente.
- Linha 4: Interseção do plano B com a face superior da vertente
- Linha 5: Interseção dos planos A e B.

A análise é facilitada pela utilização do estereograma (Figura 2.10), no qual são plotados os planos, medidas dos ângulos e a numeração das interseções dos vários planos.

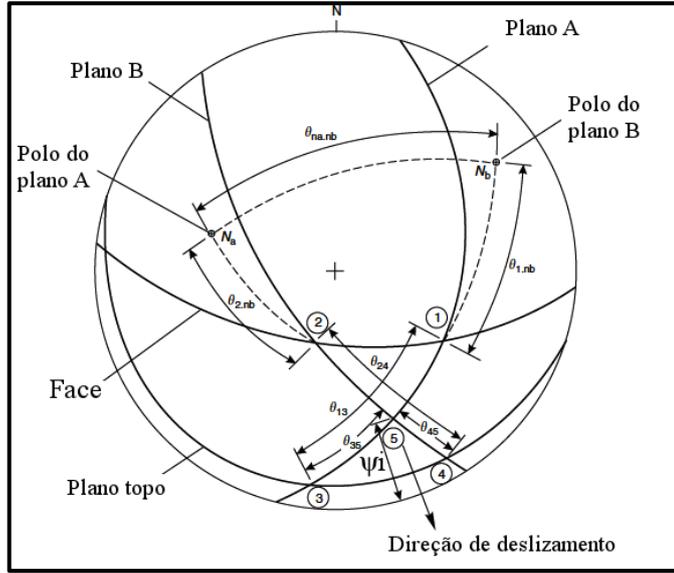


Figura 2.10 – Projeção estereográfica dos elementos geométricos para a análise da estabilidade de cunha (adaptado - Wyllie e Mah, 2004)

Finalmente, o fator de segurança poderá ser dado pela equação:

$$FS = \frac{3}{\gamma_r H} (c_A X + c_B Y) + \left(A - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} X \right) \tan \phi_A + \left(B - \frac{\gamma_w}{2\gamma_r} Y \right) \tan \phi_B \quad (2.16)$$

sendo, γ_r o peso específico da rocha, γ_w o peso específico da água e H a altura da cunha. Os valores dos parâmetros X, Y, A e B, que são adimensionais e dependem da geometria da cunha, são calculados a partir das seguintes equações:

$$X = \left(\frac{\sin \theta_{24}}{\sin \theta_{45} \cos \theta_{2.na}} \right) \quad (2.17)$$

$$Y = \left(\frac{\sin \theta_{13}}{\sin \theta_{35} \cos \theta_{1.nb}} \right) \quad (2.18)$$

$$A = \left(\frac{\cos \psi_A - \cos \psi_B \cos \theta_{na.nb}}{\sin \psi_i \sin^2 \theta_{na.nb}} \right) \quad (2.19)$$

$$B = \left(\frac{\cos \psi_B - \cos \psi_A \cos \theta_{na.nb}}{\sin \psi_i \sin^2 \theta_{na.nb}} \right) \quad (2.20)$$

2.3.3. Tombamento

O tombamento é caracterizado pela rotação/flexão de colunas ou blocos de rocha sobre uma base fixa. Existem diferentes tipos de tombamento e Goodman e Bray (1976) os subdividem em flexural, tombamento de blocos e tombamento bloco-flexural.

Os métodos para análise do tombamento são distintos de acordo com o seu tipo, portanto é importante distinguir entre os tipos de tombamento, encontrado em campo, para utilização da análise apropriada. Embora se saiba da relevância e da abrangência da análise do tombamento por blocos, neste trabalho se optou por se avaliar previamente o tombamento flexural.

O tombamento flexural ocorre principalmente em taludes rochosos, cujas direções da foliação ou estratificação são praticamente paralelas à direção do talude e mergulham no sentido contrário ao do mesmo (Figura 2.3 (c)). Segundo Goodman (1989) para que os planos caracterizem um possível tombamento, a relação entre as direções de mergulho da face do talude (α_f) e do plano de deslizamento (α_p) será menor que 30° :

$$|(\alpha_f - \alpha_p)| < 30^\circ \quad (2.21)$$

As lâminas rochosas separadas pelas discontinuidades podem, dependendo do atrito entre elas e do próprio peso, podem deslizar uma sobre a outra e fletir, até romperem por tração em sua base, finalizando com o tombamento (Goodman, 1989).

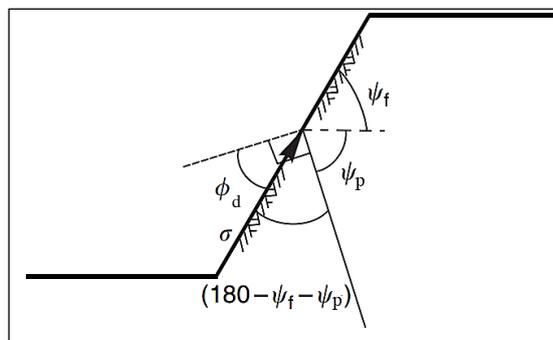


Figura 2.11 – Condição para o tombamento (adaptado - Wyllie e Mah, 2004)

Sendo ψ_f o mergulho da face do talude e ψ_p o mergulho dos planos que formam as fatias de rocha (Figura 2.11). Uma das condições cinemáticas para o tombamento é dada pela equação (2.22):

$$\psi_p \geq (90 - \psi_f) + \phi_d \quad (2.22)$$

De acordo com a metodologia do Cone de Atrito, ϕ_d é o ângulo entre a normal do plano deslizando e a inclinação do talude, onde ϕ_d é considerado o ângulo de atrito solicitante entre as fatias de rocha (Goodman, 1989) e pode ser calculado por:

$$\phi_d = \arccos(n_j \cdot V_m) \quad (2.23)$$

Sendo n_j o vetor normal ao plano da junta e V_m o vetor mergulho do talude.

Finalmente, o fator de segurança para tombamento pode ser definido com a equação (2.24), onde se tem a divisão da tangente do ângulo de atrito da junta (ϕ) pela tangente do ângulo de atrito solicitante:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_d} \quad (2.24)$$

2.4. CRITÉRIOS DE RUPTURA

Os critérios de ruptura são utilizados de acordo com as características de cada material a ser analisado. Em solos é normalmente empregado o critério de Mohr-Coulomb, com seus parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito. Já em rochas, dependerá das características das descontinuidades podendo ser empregado os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb, Barton-Bandis ou Hoek-Brown.

Em alguns programas geotécnicos os parâmetros de resistência são declarados apenas em termos do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, quando necessário, é possível estimar a coesão e o ângulo de atrito interno equivalentes aos critérios de Barton-Bandis e

Hoek-Brown. Os critérios são melhor descritos a seguir, como também, a determinação da equivalência desses parâmetros.

2.4.1. Mohr-Coulomb (MC)

Segundo Assis (2003), o critério de Mohr-Coulomb é normalmente aplicado para solos, alguns tipos de rocha intacta e para descontinuidade planas e lisas, ou aquelas controladas por preenchimento.

Mohr apresentou uma teoria para ruptura em materiais, aonde afirmava que um material se rompe pela relação entre a tensão normal e a tensão de cisalhamento em um plano de ruptura (Das, 2007). O círculo representativo do estado de tensões, chamado de círculo de Mohr, identificará uma ruptura quando tangenciar a curva chamada de envoltória de ruptura do material (Figura 2.12). Comumente a envoltória curva é ajustada por uma reta no intervalo de tensões normais de interesse. Com a definição dessa reta, o seu coeficiente linear (c), não terá mais o sentido de coesão (parcela de resistência independente da existência da tensão normal) e sim de um intercepto de coesão (coeficiente da equação que expressa a resistência em função da tensão normal) (Pinto, 2006).

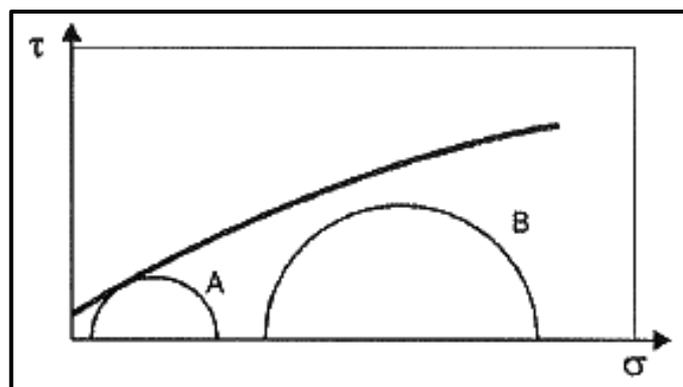


Figura 2.12 – Critério de ruptura de Mohr (Círculo A – ruptura; Círculo B, não ruptura)
(Pinto, 2006)

Justifica-se a expressão ‘critério de Mohr-Coulomb’ ao utilizar uma reta como envoltória de Mohr, ficando seu critério de resistência análogo ao de Coulomb, o qual, afirma que na maioria dos problemas é suficiente aproximar a tensão de cisalhamento no plano de

ruptura por uma função linear da tensão normal (Das, 2007). Essa função linear pode ser descrita como:

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.25)$$

onde σ_n representa as tensões normais e τ as tensões cisalhantes atuantes em um plano cujo parâmetro c representa a coesão e ϕ o ângulo de atrito.

A partir da representação do círculo de Mohr (Figura 2.13), pode-se expressar a função da resistência em termos das tensões principais maior (σ_1) e menor (σ_3):

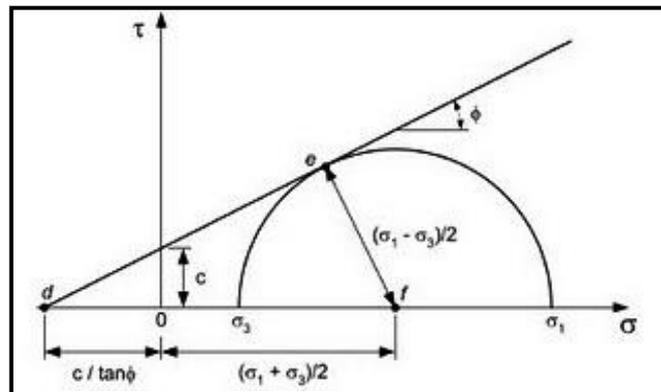


Figura 2.13 – Círculo de Mohr e envoltória de ruptura

$$\sigma_1 = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} + \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \sigma_3 \quad (2.26)$$

Entretanto,

$$\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.27)$$

e

$$\tan \left(45 + \frac{\phi}{2} \right) = \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2.28)$$

Assim,

$$\sigma_1 = 2c \tan\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) + \sigma_3 \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2.29)$$

2.4.2. Barton-Bandis (BB)

O critério, atualmente conhecido como Barton-Bandis, é aplicado para estimar a resistência ao cisalhamento de descontinuidades rugosas, visto que a importância da rugosidade diminui à medida que aumenta a abertura ou o material de preenchimento. Em 1973, Barton propôs um modelo que considerava o coeficiente de rugosidade das paredes das descontinuidades (JRC), a resistência à compressão da rocha na superfície da fratura (JCS), o ângulo de atrito básico (ϕ_b) e a tensão normal ao plano (σ_n). Barton e Choubey (1977) modificaram a parcela referente ao ϕ_b , resultando na seguinte equação da envoltória de resistência das descontinuidades:

$$\tau = \sigma_n \tan\left[JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r\right] \quad (2.30)$$

sendo ϕ_r , ângulo de atrito residual, referência à condição residual das superfícies de juntas naturais, que é atingido só depois de grandes deslocamentos de cisalhamento.

Contudo, ϕ_b refere-se às superfícies planas e lisas em rocha fresca e pode ser considerado como constante do material. Tanto o ϕ_r quanto o ϕ_b , representam as resistências mínimas de cisalhamento da junta (Huallanca, 2004).

A obtenção dos parâmetros pico equivalentes de Mohr-Coulomb (c_t e ϕ_t) é feita ajustando-se uma relação linear à envoltória não-linear do modelo de Barton-Bandis, tendo como referência o ponto de σ_n desejado (Figura 2.14).

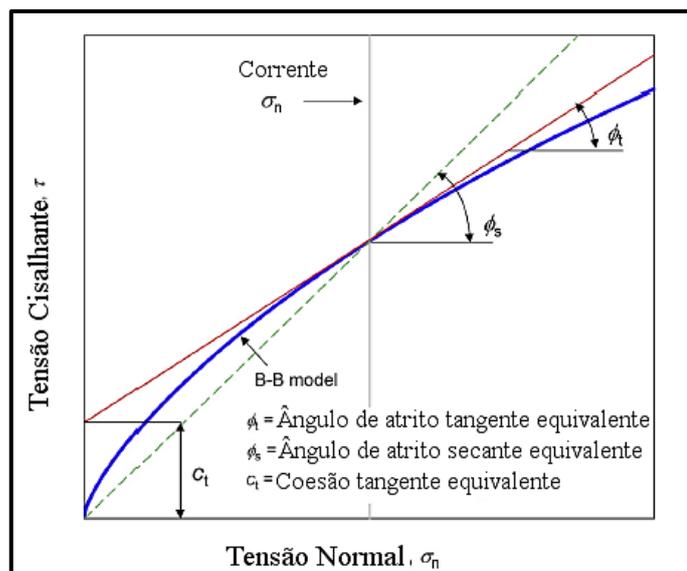


Figura 2.14 – Linearização do modelo Barton-Bandis, para Ângulo de atrito e coesão equivalentes (modificado de Prassetyo, Gutierrez e Barton (2017)).

A partir dessa linearização, Prassetyo, Gutierrez e Barton (2017) obtiveram equações para a obtenção dos parâmetros equivalentes:

$$A = \tan \left[JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (2.31)$$

$$B = (1 + A^2) \frac{JRC}{\ln 10} \quad (2.32)$$

$$\phi_t = \arctan(A - B) \quad (2.33)$$

$$c_t = \sigma_n B \quad (2.34)$$

2.4.3. Hoek-Brown (HB)

O critério de falha de Hoek-Brown (1983) foi desenvolvido para a estimativa da resistência de maciço de rocha de elevada qualidade com o propósito de fornecer dados de partida em projetos de escavações subterrâneas. O critério parte das propriedades da rocha intacta, que a partir da teoria de Griffith, para logo introduzir fatores redutores

dessas propriedades, segundo as características do maciço rochoso. O critério originalmente é expresso pela equação ((2.35):

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0,5} \quad (2.35)$$

onde, σ'_1 e σ'_3 são, respectivamente, as tensões principais efetivas máxima e mínima, σ_{ci} é a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, e, m_i e s são constantes do material, sendo $s = 1$ para a rocha intacta.

Hoek et al. (2002) apresentaram a versão generalizada do critério de ruptura de Hoek-Brown (Hoek, 1983). Nesse critério, os autores incorporam as características tanto da rocha intacta, das feições geológicas quanto da qualidade e dimensão da obra em análise para compor o comportamento resistente do maciço rochoso. O critério de Hoek-Brown generalizado pode ser escrito como,

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2.36)$$

sendo:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (2.37)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (2.38)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (2.39)$$

m_b é o valor reduzido da constante do material intacto m_i , GSI é o Índice de Qualidade Geológica e D é uma constante que descreve a qualidade do desmonte ($D = 0$ para desmonte de excelente qualidade e $D = 1$ para desmonte de qualidade ruim).

A conversão do critério de Hoek-Brown para Mohr-coulomb é feita ajustando-se uma relação linear à envoltória gerada pela resolução da equação (2.36). A determinação das equivalências para o ângulo de atrito e para a coesão efetivos podem ser feitas através das respectivas equações (2.40) e (2.41), de acordo com Hoek et al. (2002):

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (2.40)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})/((1+a)(2+a))}} \quad (2.41)$$

sendo:

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (2.42)$$

e sendo o valor de σ'_{3max} para taludes:

$$\sigma'_{3max} = \sigma'_{cm} \left(0,72 \left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0,91} \right) \quad (2.43)$$

com H sendo a altura do talude e σ'_{cm} a resistência do maciço, que pode ser calculada por meio da equação (2.44)(2.48):

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \left[\frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s))(m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)} \right] \quad (2.44)$$

2.5. ABORDAGENS PARA ANÁLISES DE ESTABILIDADE DE TALUDES

As análises de estabilidade de taludes estão divididas basicamente em dois grupos: os que se baseiam em estado de equilíbrio limite e os que se baseiam em análises de

deslocamentos. O primeiro está incorporado nos métodos analíticos, que preveem a possibilidade de ruptura através do estudo das forças que atuam ao longo de uma superfície potencial, sendo essa a solução de problemas práticos de engenharia mais fácil e mais difundida.

Porém, a necessidade de avaliar taludes cada vez mais altos, tornaram esse método, por si só, insuficiente. Sendo então necessária uma segunda metodologia, conhecida como métodos numéricos, que incrementa outros comportamentos para avaliar o estado limite desse talude. A partir dessa incorporação de comportamentos tensão/deformação, deslocamentos, fator tempo e tensões confinantes, tornam a análise mais completa, precisa e, conseqüentemente, mais complexa (Assis, 2003).

Tantos os métodos analíticos quanto os numéricos, geralmente são aplicados com uma abordagem determinística. Porém, uma evolução da abordagem determinística para uma abordagem probabilística tornou-se necessária para quantificar a propagação das incertezas geotécnicas e para estudar os seus efeitos na confiabilidade da estabilidade dos taludes (Costa, 2005).

Com a utilização da abordagem probabilística a obtenção do valor do risco, torna-se possível. Mensurar o quanto um empreendimento está em perigo, pode ajudar em tomadas decisões mais assertivas e menos catastróficas. As metodologias e abordagens serão detalhadas nos tópicos a seguir.

2.5.1. Métodos analíticos

Em mecânica das rochas os métodos analíticos se baseiam em técnicas de equilíbrio limite, envolvendo o estudo do movimento de blocos de rocha (corpos rígidos) por descontinuidades pré-existentes, formulando-se hipóteses sobre as tensões ao longo das superfícies potenciais de ruptura.

O estudo do movimento de blocos de rocha como um corpo rígido compreende modos de rupturas básicos (planar, cunha e tombamento). Em quaisquer um destes modelos, o fator

de segurança (FS) representará o resultado de equações que satisfaçam o equilíbrio estático de forças e/ou momentos atuantes.

Já é de comum utilização no mercado geotécnico alguns programas computacionais para cálculos de estabilidade de taludes através de metodologias analíticas. Dentro do contexto de materiais rochosos o pacote da *RocScience* é muito utilizado, abrangendo programas como: *Dips* (Rocscience, 2016a), *RocPlane* (Rocscience, 2016b), *Swedge* (Rocscience, 2014a) e *RocTopple* (Rocscience, 2014b).

O *RocPlane* 3.0, *Swedge* 6.0 e *RocTopple* 1.0 realizam análises de estabilidade, respectivamente para ruptura planar, em cunha e tombamento por blocos, tanto deterministicamente quanto probabilisticamente. Sendo que o *Dips* 7.0 pode anteceder essas análises com um estudo que permite a visualização e a determinação da viabilidade cinemática desses movimentos rochosos.

Ainda, dentro do pacote de programas da *RocScience* existem alguns que fazem análises numéricas por elementos finitos, sua estrutura mais amigável facilita o uso e dificulta a manipulação da programação interna, limitando seu uso. Para resolver essa questão foi indagada outras ferramentas numéricas para desenvolvimento dessa dissertação.

2.5.2. Métodos numéricos

A metodologia numérica leva em consideração as relações tensão/deformação dos diversos materiais presentes na estrutura analisada. De acordo com Franco (2006), a grande vantagem dos métodos numéricos reside no processo de discretização, que reduz o problema contínuo, de um número infinito de variáveis, em um problema discreto, com um número finito de variáveis e de pontos pertencentes ao domínio, tornando o problema computacionalmente viável.

Os principais métodos numéricos utilizados para a resolução de equações complexas são: método dos elementos finitos, método das diferenças finitas, método dos elementos de contorno e método dos volumes finitos (Chapra, 2016).

A escolha de um determinado método numérico a ser utilizado no âmbito de obras geotécnicas leva em consideração as limitações, vantagens e desvantagens de cada modelo adotado. A presente dissertação optou pela utilização do *software* FLAC^{3D}, baseado em diferenças finitas, descrito sinteticamente a seguir.

- FLAC^{3D}

O *Fast Lagrangian Analysis of Continua in three dimensions* (FLAC^{3D}), simula o comportamento tridimensional de estruturas construídas em solo, rochas ou outros materiais possíveis, sujeitos a fluxo plástico quando os seus limites em termos de rotura são atingidos. Os materiais são representados por elementos poliédricos dentro de uma grelha tridimensional que é ajustada pelo utilizador de forma a ser compatível com o objeto a ser modelado (Itasca, 2012).

O sistema de equações algébricas que faz a relação entre os deslocamentos e forças nodais é construído a partir das funções que descrevem o comportamento dos elementos. Contudo, este sistema de equações é resolvido através de relaxação dinâmica, um procedimento explícito em função do tempo no qual as equações dinâmicas do movimento são integradas em cada avanço de ciclo. As soluções estáticas são obtidas por meio de inclusão de fatores de amortização que gradualmente removem energia cinética do sistema (Michalowski e Dawson, 2002).

O código de solução explícita no tempo, determina o evento de falha utilizando a força desbalanceada. A modelação tridimensional no FLAC^{3D} é conseguida através da sua linguagem de programação interna, FISH, criando funções capazes de simular o processo da escavação dos taludes, monitorizar e extrair as variáveis pretendidas. Essa linguagem de programação permite ao utilizador tirar maiores proveitos das capacidades do programa. Sua formulação consegue acomodar análises com grandes deslocamentos, deformações e comportamento não linear do material mesmo que este ultrapasse os patamares de rotura, cedência ou mesmo ocorrência de colapso (Caldeira, 2016).

A velocidade de cálculo de um modelo FLAC^{3D} varia diretamente em função do número de elementos. Portanto, é necessário seleccionar um número de zonas que garanta um

equilíbrio entre a precisão exigida e a velocidade de solução. Ao construir um modelo FLAC^{3D}, é uma boa prática começar com uma malha que tenha menos zonas para executar testes simples e, em seguida, fazer o refinamento aumentando o número de zonas para melhorar a precisão (Itasca, 2012).

O FLAC^{3D}, como alguns outros *softwares*, possui a opção de escolha do modelo constitutivo utilizar para resolver o problema. Dentre os modelos existentes tem-se Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e Ubiquitous-joint (Juntas ubíquas) que serão utilizados nessa dissertação. Os critérios de Mohr-Coulomb e Hoek-Brown foram detalhados dentro do subcapítulo 2.4, ‘critérios de ruptura’, e o critério das Juntas ubíquas será detalhado a seguir.

- Junta ubíquas (UJ)

O modelo de juntas ubíquas disponível no FLAC^{3D} é baseado no modelo de Mohr-Coulomb isotrópico. O material isotrópico e os planos de fraqueza que o sobrepoem são analisados pelo critério de Mohr-Coulomb, porém uma menor resistência é aplicada aos planos de fraqueza que poderão ter apenas uma orientação predeterminada. Em outras palavras, o modelo de juntas ubíquas é um modelo elasto-plástico e isotrópico com exceção da orientação dos planos de fraqueza.

2.5.3. Incertezas em geotecnia

Comparada com outras áreas da engenharia, a engenharia geotécnica lida com grandes níveis de incerteza. Segundo Beck (2011), entre essas incertezas, algumas podem ser classificadas como intrínsecas e epistêmicas. Outro tipo de incerteza que não se enquadra nessas classificações é o erro humano.

- Incerteza intrínseca: é um tipo de incerteza que é de difícil diminuição e não pode ser eliminada, pois faz parte da natureza dos processos envolvidos. Essa incerteza se evidencia, por exemplo, na intensidade de fenômenos ambientais (tempestades, secas). Também, a grande variabilidade espacial dos parâmetros de uma determinada rocha, imposta por sua origem geológica.

- Incerteza epistêmica: é caracterizada pela falta de conhecimento das variáveis envolvidas no projeto. Ela pode ser devida a um número insuficiente de ensaios ou medições, e também a simplificações extremas dos modelos. Esses tipos de incertezas podem ser reduzidas e até eliminadas, por meio de um maior número de informações, melhores técnicas de medição, dentre outros cuidados.
- Erro humano: é a ação direta do ser humano que afeta o desempenho e a segurança de um sistema, de maneira indesejada. Motivação e treinamento podem reduzir esse tipo de erro.

Um conjunto de medidas realizadas para a determinação de um parâmetro, passando por um tratamento estatístico, pode quantificar suas incertezas e chegar a valores de intervalos de confiança. Estas propriedades incertas, em solo e/ou rocha, são definidas como as variáveis aleatórias representadas estatisticamente por sua média, desvio padrão ou coeficiente de variação e distribuição de probabilidade da função. Quando não se dispõe de um número suficiente de ensaios pode-se, a princípio, utilizar coeficientes de variação estimados (desvio-padrão sobre a média), a partir de valores típicos (Tabela 2.1; Assis, 2003).

Tabela 2.1 – Valores típicos do coeficiente de variação de algumas propriedades geotécnicas (Assis, 2003)

Parâmetro	Coeficiente de Variação (%)
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo de atrito	10 (04 a 20)

De acordo com Costa (2005), as análises probabilísticas vêm para quantificar a propagação dessas incertezas geotécnicas e estudar os seus efeitos na confiabilidade na estabilidade dos taludes.

2.5.4. Abordagem probabilística

A abordagem probabilística é conhecida pelo estudo de problemas que possuam variabilidade em seus dados e modelos, utilizando de métodos estatísticos e probabilísticos como alternativa para incorporar a variabilidade de parâmetros, quantificar as origens das incertezas geotécnicas e então calcular o risco de falha ou a confiabilidade destas estruturas. Os parâmetros de entrada podem ser representados através de variáveis aleatórias, deixando estes de ser caracterizados como um valor único para agora assumir qualquer valor dentro de um dado intervalo (Peixoto, 2015).

Ainda, segundo Peixoto (2015) a maioria dos métodos probabilísticos pode dividir-se em métodos de amostragem e de simulação. O Método das Estimativas Pontuais e o Método de Primeira Ordem Segundo Momento fazem parte dos métodos de amostragem, e são classificados como métodos indiretos ou aproximados. Estes necessitam apenas do conhecimento da média e do desvio padrão das variáveis de entrada. Já os métodos de simulação, onde o mais conhecido é a simulação de Monte Carlo, define-se como método direto ou “exato”, permitem manipular um elevado número de dados relativos a uma variável aleatória, proveniente da geração de números aleatórios, sendo então uma análise mais detalhada e abrangente dos resultados.

- Método de Monte Carlo (MMC)

A estimativa da probabilidade de falha através da técnica de simulação de Monte Carlo (SMC) pode ser apresentada como um método de solução exata. Este método considera que a variável dependente estudada pode ser calculada em função de outras variáveis, chamadas independentes, as quais suas distribuições estatísticas são conhecidas. A relação entre essas variáveis, de forma geral, pode ser descrita por uma função matemática qualquer:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.45)$$

sendo y a variável dependente e x_i as variáveis que afetam o cálculo (variáveis independentes).

Os valores das variáveis independentes podem ser obtidos por meio de um gerador de números aleatórios uniformemente distribuídos. A partir desses valores, que representam as variáveis aleatórias, a variável dependente é calculada. A função que rege a variável dependente deverá ser calculada uma quantidade de vezes, suficientemente grande, para que o nível de confiança esteja dentro do desejado $(1 - \alpha) \%$. De acordo com Harr (1987) a estimativa do número de simulações de Monte Carlo, considerando certo nível de confiança, é dada por:

$$N = \left(\frac{h_{\alpha/2}^2}{4\alpha^2} \right)^x \quad (2.46)$$

sendo: $h_{\alpha/2}$ o parâmetro de confiabilidade (desvio padrão), obtido na Tabela 2.2; α a tolerância (erro) admitida na aproximação de Monte Carlo e x o número de variáveis aleatórias independentes que afetam a variável dependente.

Tabela 2.2 – Parâmetros de confiabilidade para a distribuição normal (Harr, 1987)

Nível de Confiança (1- α) [%]	Parâmetro de Confiabilidade ($h_{\alpha/2}$)
90	1,64
95	1,96
95,45	2,00
98	2,33
99	2,58
99,5	2,81
99,73	3,00
99,9	3,29
99,99	3,89
99,994	4,00

Outra forma de avaliar se o número de simulações de Monte Carlo é suficiente para uma dada análise, é aumentar progressivamente o número de simulações até que o resultado comece a convergir para valores próximos.

Finalmente, o processo da SMC irá possibilitar os cálculos de parâmetros estatísticos da variável y como: média, variância, probabilidade, entre outros. Sendo assim, o parâmetro de interesse para essa dissertação será a probabilidade de falha, matematicamente representada pela equação Equação (2.47):

$$p_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_i \quad (2.47)$$

sendo n o número total de realizações da simulação, i a realização avaliada e n_i a função indicadora de falha (1 para falha e 0 para segurança).

Portanto, para que os valores das estatísticas e a forma da distribuição de probabilidade da variável dependente y estejam estabilizados (para casos de funções matemáticas complexas), a SMC pode requerer um tempo computacional excessivo ou até impraticável. Sendo assim, necessária a utilização de outros métodos.

- Método da Aproximação de Primeira Ordem no Valor Médio (FOMV)

Outros métodos probabilísticos tradicionais, como Primeira Ordem Segundo Momento (FOSM) e o Método de Confiabilidade de Primeira Ordem (FORM) utilizam métodos de aproximação similares e ignoram a variabilidade espacial assumindo, implicitamente, uma correlação perfeita (Yang et al., 2017). No entanto FOSM considera que as variáveis aleatórias são normalmente distribuídas, considerando apenas os primeiros dois momentos da variáveis aleatórias (Napa-García, 2015).

Melchers (2002) considera um equívoco em utilizar o nome FOSM para soluções iterativas com apenas uma iteração, sendo que essa metodologia é a chamada Método da

Aproximação de Primeira Ordem no Valor Médio (FOMV). Ou seja, FOMV é a primeira iteração do FOSM.

O nível de desempenho exigido de um talude contra instabilidade e/ou falha pode ser definido por critérios de aceitação, como mostra na Tabela 2.3. Os critérios são inicialmente expressos em termos de fator de segurança (FS) e a probabilidade de falha (P_f), ou seja, a probabilidade de que o FS seja 1 ou menos.

Tabela 2.3 – Critérios para valores típicos de FS e P_f (Read e Stacey ,2009).

Escala do talude	Consequências de falha	FS (mín.)	Critérios de aceitação
			P_f (mín.) $P[FS \leq 1,0]$
Banco	Baixa-Alta	1,1	25-50%
Inter-rampa	Baixa	1,15-1,2	25%
	Moderada	1,2	20%
	Alta	1,2-1,3	10%
Global	Baixa	1,2-1,3	15-20%
	Moderada	1,3	10%
	Alta	1,3-1,5	5%

2.5.5. Análise e gestão de riscos

Quantificar qual o risco atribuído a uma determinada estrutura tem trazido importantes significados às análises de estabilidade. De acordo com a International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE, 2004), o risco pode ser quantificado como uma medida da probabilidade e das consequências associadas a um evento, que gere prejuízos às propriedades, ao meio ambiente e, também, à vida. Portanto, é necessário a definição de um cenário, da probabilidade dos eventos provocarem danos e se avaliarem as suas respectivas consequências.

Nesse estudo um evento de falha que pode provocar consequências, é a perda total ou funcional da estrutura (talude) ou até mesmo a ruptura da mesma, atingindo outras estruturas pré-existentes (caminhões, usinas, pessoas, entre outras). Sendo assim, o risco

pode ser estimado em termos financeiros (2.48), através da quantificação dos custos associados à essa falha de projeto e da probabilidade de falha (P_f).

$$\text{Risco} = P_f \times C_f \quad (2.48)$$

sendo C_f o custo de falha.

O custo de falha total é dado pela soma de todos os custos parciais, ou seja, soma de custos de reparo, substituição dos equipamentos danificados ou perdidos, de reconstrução, de indenizações, entre outros custos menos mensuráveis. No entanto, por questões de confidencialidade e/ou falta de informações sobre o real valor desses custos, o valor do custo de falha total torna-se de difícil obtenção.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE OTIMIZADA DE TALUDES DE MINERAÇÃO

3.1. CONCEPÇÃO E CRITÉRIOS DE PROJETO

De acordo com o objetivo geral desta dissertação, que consiste na otimização dos ângulos de face dos taludes de uma seção 2D de uma mina a céu aberto, foram necessárias mais de uma abordagem para realizar as análises do comportamento das estruturas a nível global, inter-rampa e de banco.

As duas abordagens utilizadas, consideraram os efeitos escala e as condições geológicas de toda a estrutura. Em grandes escalas (global) o meio foi tratado como contínuo e em pequenas escalas (inter-rampa e banco) o meio foi tratado como meio descontínuo. Sendo assim, o ângulo global foi avaliado via modelagem numérica e inter-rampa e banco foram analisados por métodos analíticos (Figura 3.1).

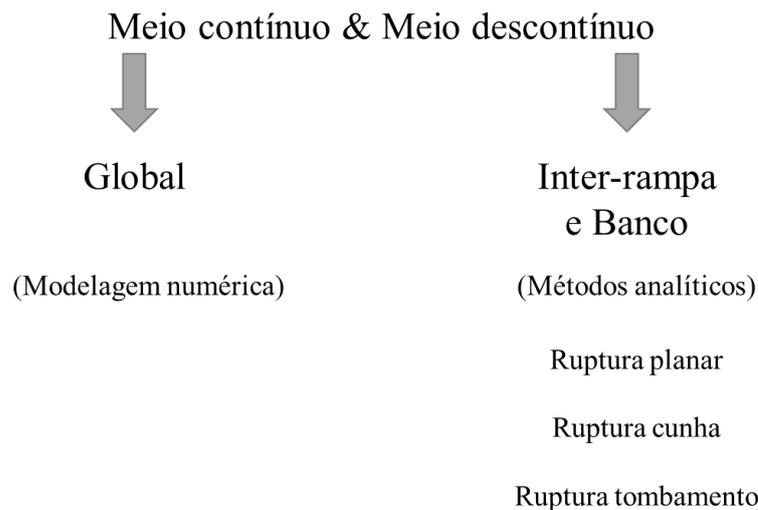


Figura 3.1 – Fluxograma das metodologias utilizadas nas análises: nível global e de inter-rampa e banco

As análises de estabilidade e otimização foram feitas em uma seção 2D de uma mina a céu aberto, com extração de minério de ferro e ainda em operação, localizada no Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais (Brasil). Devido às exigências de confidencialidade, seu nome e localização exata não serão expostos nesta dissertação.

A modelagem numérica foi realizada via FLAC^{3D} 6.0 com o uso da console IPython e para os métodos analíticos foi criado um *software*, denominado ProBench, em linguagem Python. Esta dissertação utilizou as potencialidades da modelagem numérica aliada a técnicas de otimização, baseadas no lucro e metodologias analíticas aliadas a técnicas de otimização, baseadas no fator de segurança.

3.2. ABORDAGEM NUMÉRICA

Para a modelagem numérica foi utilizado um modelo de blocos, da mina estudada, como ponto de partida para a criação do modelo numérico. Assim como o modelo de blocos, a classificação dos maciços, caracterização das juntas e foliações, e alguns parâmetros geomecânicos foram disponibilizados pela empresa responsável da mina.

De acordo com a necessidade, os parâmetros que não foram disponibilizados pela empresa tiveram seus valores estimados ou adotados. Sendo assim, foi realizada uma consolidação da base de dados geotécnicos dessa mina antes da modelagem. Um seção 2D foi gerada a partir do modelo 3D, e sobre ela as metodologias deste estudo foram aplicadas.

Foi gerada um equação linear (superfície resposta) para representar o modelo numérico da seção 2D, e assim, diminuir substancialmente o tempo de execução numérica e facilitar a aplicação de abordagens probabilísticas. O Fluxograma (Figura 3.2) mostra as fases que foram executadas nessa abordagem.

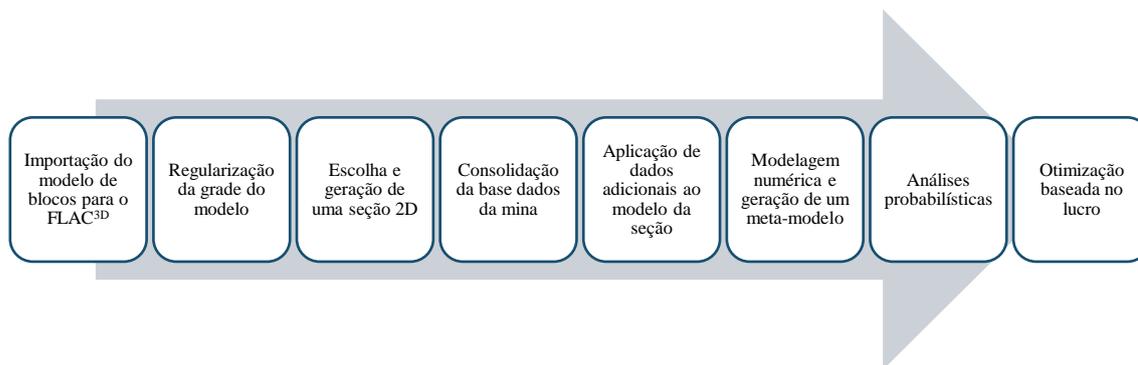


Figura 3.2 – Fluxograma geral da otimização a nível global

As fases para a geração da superfície de resposta, também chamada de meta-modelo, foram realizadas via FLAC^{3D} acoplado ao Python e as fases de análise probabilística e otimização foram feitas exclusivamente via Python.

3.2.1. Modelo de blocos da mina estudada

Uma das questões que preocupa as empresas do setor mineral é como definir as porções de minério do depósito que podem ser economicamente extraídas. De acordo com King (2011), as estimativas de recursos por meio de ferramentas computacionais geralmente envolvem a geração de modelos de blocos 3D. Cada bloco que compõe o modelo representa um volume e tem um determinado número de atributos numéricos (tipicamente teores, densidades ou parâmetros metalúrgicos) ou alfanuméricos (ex.: tipo de rocha).

A partir dessas informações pode-se calcular o valor econômico para cada bloco, que é, quase sempre, o benefício que se espera obter com a extração do seu conteúdo mineral presente. As informações geológicas de base foram disponibilizadas em formato digital correspondente ao programa comercial Vulcan (MAPTEK, 2017) e para a interpretação primária do modelo de blocos, bem como para exportar os dados do mesmo em arquivos do tipo *.txt, foi utilizado o programa comercial DATAMINE (2017). Com o intuito de construir um critério de resistência robusto, optou-se por incorporar informações adicionais ao modelo de blocos da mina com a classificação geomecânica (Figura 3.3).

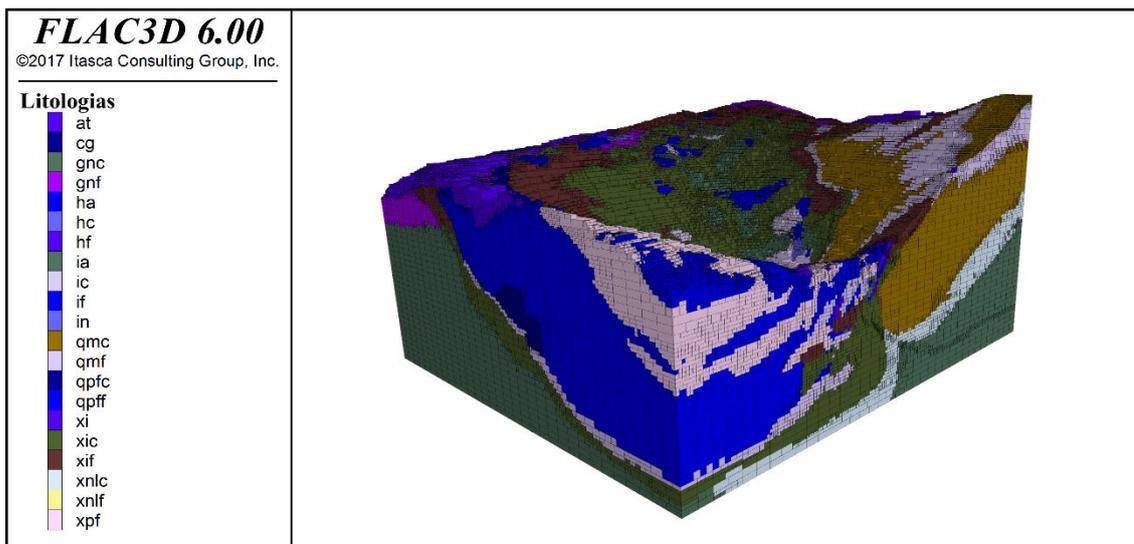


Figura 3.3 – Modelo de blocos: litologias

Neste caso, por exemplo, a distribuição litológica no modelo de blocos da mina foi expressa reduzida ao domínio de interesse do modelo numérico. A partir do modelo de blocos importado para o FLAC^{3D} contendo as informações geológicas e geotécnicas e da consolidação da base dados, foi realizada a regularização da malha, a inclusão de teores e valorização de cada bloco.

É necessário cuidado ao selecionar o número de zonas para um modelo, porque um equilíbrio deve ser atingido entre a precisão exigida e a velocidade da solução. Embora existam muitos aspectos de um modelo FLAC^{3D} que afetam a velocidade de cálculo, uma vez definidos os parâmetros básicos, a velocidade varia diretamente em função do número de elementos (Itasca Consulting Group INC, 2012).

O modelo de blocos utilizado como dado de entrada era composto por 364.604 blocos não refinados. Na sua importação foi realizado o refinamento destes blocos, transformando-os em 1.882.426 zonas cúbicas regulares de 5 m. Para um resultado de fator de segurança desse modelo 3D foram necessários cinco dias de execução. A partir destes resultados, pode ser visto que no momento, o estudo probabilístico do modelo 3D é impraticável para esta dissertação, uma vez que a metodologia utilizada exigiria a repetição desse processo 100 vezes e não haveria tempo hábil para essa prática. A metodologia para análise probabilística será melhor abordada posteriormente.

Portanto, as análises foram feitas em uma seção 2D, com a grade regularizada. A seção foi escolhida dentro de algumas opções já utilizadas pelos geotécnicos da mina em questão.

- Regularização da grade

O modelo de blocos apresentava uma sub-blocagem em múltiplos níveis, rotina comum aos planejadores de mina. No entanto, devido ao grande número de zonas e formatos extremamente alongadas de algumas, como pode ser melhor observado na Figura 3.4, para a criação da seção “A” uma melhora da malha do modelo de blocos foi necessária. Uma rotina de correção via refinamento automático foi implementada e aplicada ao modelo.

- Criação da seção 2D

A escolha da seção a ser estudada foi feita através da planta disponibilizada pela empresa, em formato *.DWG pelo *software* AutoCAD, onde continha toda a topografia final da mina estudada e, também, a marcação das seções anteriormente estudadas pelos geotécnicos da mina em *software* 2D, deterministicamente.

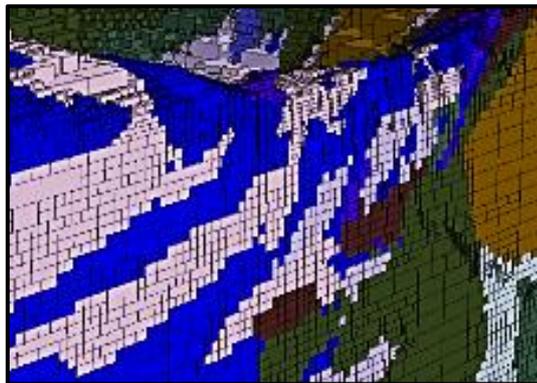


Figura 3.4 – Detalhamento das sub-blocagens e da irregularidade da grade

Após a escolha da seção, foram obtidas as seguintes informações: coordenadas inicial e final e coordenada pela qual a seção passa no pé do talude final. A partir destes dados, iniciou-se a criação da geometria refinada dessa seção, agora no FLAC^{3D}. Na sequência,

utilizando as coordenadas dos centroides dessas zonas, foi possível preenchê-la com as informações necessárias a partir do modelo de blocos.

Apesar do modelo de blocos possuir todas as características geológicas e geomecânicas carimbadas em suas zonas, foram copiadas apenas as características pertencentes à seção. Por exemplo, a seção utilizada não possui todas as litologias existentes no modelo de blocos.

3.2.2. Consolidação da base de dados

A base de dados da Mina estudada foi composta de informações prévias, de acordo com a experiência dos geotécnicos da mina, ensaios de laboratório em rocha intacta e, quando necessário, parâmetros estimados.

- Geomecânica

Os parâmetros mecânicos de algumas litologias muito friáveis, que não possuíam ensaios, foram disponibilizados pela empresa, considerando a experiência prática dos profissionais geotécnicos da mina. Essas litologias foram modeladas a partir do critério de ruptura de Mohr-Coulomb (MC).

Como pode ser observado na Figura 4.6, a seção estudada possui 10 litologias. As que não são avaliadas pelo critério MC, têm como base o critério de Hoek-Brown (HB) generalizado. Contudo, sabe-se que este critério de ruptura é isotrópico e, conseqüentemente, não consegue representar o comportamento anisotrópico imposto pela presença de feições geológicas estruturais como foliações. O mapeamento geológico, oferecido pela empresa, mostra a presença de foliações em alguns litotipos do local de estudo. Para poder considerar este tipo de feição, o modelo de juntas ubíquas (UJ) será utilizado.

A Tabela 3.1 apresenta as 10 litologias presentes na seção estudada, suas características e critério de ruptura aplicado:

Tabela 3.1 – Características das litologias presentes na seção 2D e respectivos critérios de ruptura

Nomenclatura da litologia	Características	Critério de ruptura
“at”	Solo	Mohr-Coulomb
“gnc”	Rocha compacta	Hoek-Brown
“gnf”	Rocha friável	Mohr-Coulomb
“ia”	Rocha compacta com foliações	Juntas ubíquas
“ic”	Rocha compacta com foliações	Juntas ubíquas
“if”	Rocha friável	Mohr-Coulomb
“gnc”	Rocha compacta	Hoek-Brown
“qpfc”	Rocha compacta	Hoek-Brown
“xic”	Rocha compacta com foliações	Juntas ubíquas
“xif”	Rocha friável	Mohr-Coulomb

Sendo que o critério base é o de Hoek-Brown generalizado, a consideração de um modelo de juntas ubíquas demanda a estimativa de parâmetros equivalente de Mohr-Coulomb para o contínuo isotrópico e para as foliações. Os parâmetros das foliações e das discontinuidades foram estimados, como base no critério de Barton-Bandis, pela empresa e posteriormente disponibilizados à dissertante. O desvio padrão para os parâmetros do critério de ruptura MC e para foliação seguiram os coeficientes de variação expressos na Tabela 2.1.

Os parâmetros da distribuição estatística do GSI foram obtidos a partir de dados fornecido pela empresa para vários furos de sondagens. A partir dos resultados dos ensaios geotécnicos realizados pela empresa, foi utilizado o *software* RocData (Rocscience, 2016c) para fornecer gráficos da estimativa de parâmetros de resistência típicos para esses tipos de rocha. Os gráficos possibilitaram uma análise crítica dos resultados de laboratório, além da obtenção de parâmetros importantes para as análises de estabilidade, como: parâmetros da rocha intacta, constante m_i , σ_{ci} , módulo de Young (E_i).

Após essa análise crítica e com o intuito das análises probabilísticas, foi criada uma rotina em Python que retorna os valores de m_i e s_{ci} , como também os valores do desvio padrão dessas variáveis.

Na rotina em Python foi criada uma função que excuta a equação (2.35) e que retorna o valor da tensão principal efetiva σ_1' . Essa função foi otimizada por uma função de ajuste baseada em mínimos quadrados não lineares da biblioteca Scipy do Python ("scipy.optimize.curve_fit", 2017). Essa função de ajuste terá como resultado os valores ótimos de m_i e σ_{ci} , como também, os valores de seus desvios. Os parâmetros de entrada "s" e "a", são considerados de rocha intacta, ou seja, $s = 1,0$ e $a = 0,5$.

As variáveis "m_b", "s" e "a" foram modeladas como aleatórias e dependentes das variáveis GSI, m_i e σ_{ci} . Essa dependência, pode ser observada nas equações (2.36), (2.37) e (2.38). Com a utilização de uma metodologia de abordagem probabilística via Monte Carlo, obteve-se números aleatórios uniformemente distribuídos das variáveis GSI, m_i e σ_{ci} . A partir desses números, as variáveis "m_b", "s" e "a" foram geradas e, assim, suas médias e desvios padrões puderam ser calculados.

Por questões de confidencialidade, os teores reais do modelo de blocos não foram copiados para a seção. No entanto, foi necessário adotar valores para carimbar nas zonas, para que os cálculos do benefício pudessem ser realizados.

- Teor e valorização das zonas

Partiu-se da premissa de que apenas as litologias 'ia', 'ic' e 'if', presentes na seção, apresentam um determinado teor de minério aproveitável. Sendo assim, todas as outras litologias ou por não conterem minério ou por terem um teor muito baixo do mesmo, são consideradas estéril. Sendo assim, carimbou-se nas zonas o teor referente a sua litologia. As litologias citadas acima foram carimbadas com um teor de minério de ferro de 45%, minério considerado pobre, e todas as outras com 0% (estéril). De acordo com a classificação adotada, a litologia com teor de minério abaixo de 30% é considerada estéril,

acima de 30 % e menor que 52% é minério pobre e acima de 52% é minério rico. Para cada classificação, implica uma recuperação diferente.

Com a seção carimbada com os teores, foram criadas funções dentro da rotina para o cálculo do benefício de cada zona, podendo o benefício ser positivo ou negativo. A função benefício necessita das seguintes informações por zona:

- Teor;
- Massa = volume da zona x densidade da litologia;
- Custo de lavra (CL), custo de processo (CP) e custo de venda (CV);
- Recuperação do minério pobre (Rec_P) e recuperação do minério rico (Rec_R);
- Preço de venda do minério (PV).

O teor sendo agora uma característica de cada zona, será acessado da mesma forma que a densidade dessa zona. Considerando que os resultados são expressos para uma seção 2D, o volume é calculado com a direção em $y = 1,0$ (espessura da seção). Sabendo o volume e a densidade, o cálculo da massa, em toneladas, foi realizado. As outras informações necessárias foram obtidas através da empresa, porém com um fator aplicado aos valores reais, para garantir a confidencialidade dos dados. A tabela 3.1 apresenta alguns valores utilizados para execução dos cálculos do benefício:

Tabela 3.2 – Recuperação e valores, em dólares por tonelada, utilizados para cálculos do benefício de cada zona

Recuperação para minério rico	100%
Recuperação para minério pobre	60%
Custo de lavra	\$ 3,00
Custo de processo	\$ 6,00
Custo de venda	\$ 20,00
Preço de venda	\$ 80,00

De acordo com Hustrulid et al. (2013), a função benefício é expressa por:

$$\text{Benefício} = \text{Receita} - \text{Custo} \quad (3.1)$$

Receita é o saldo obtido com a venda do minério. O custo de venda tem que ser descontado desse montante, visto que são custos referentes a atividades pós processamento do minério (transporte, disposição, armazenamento, entre outros). O valor da receita segue a equação abaixo:

$$\text{Receita} = \text{massa} \times \text{teor} \times \text{Rec} \times (PV - CV) \quad (3.2)$$

A recuperação (Rec) será de acordo com a classificação do minério (rico ou pobre). Caso a litologia seja considerada estéril, ou seja, seu teor é menor que 30%, essa zona não terá valor de receita. Ela terá apenas custo e, conseqüentemente, o valor do seu benefício será negativo. O custo é soma dos custos de lavra e dos custos de processos, sendo assim:

$$\text{Custo} = \text{massa} \times (CL + CP) \quad (3.3)$$

Após os cálculos de benefício para cada zona, a rotina também carimba na respectiva zona o seu benefício.

A título de exemplo, duas zonas quaisquer (Z1 e Z2) com um mesmo volume de 25 m³ (5 x 1 x 5). A Z1 sendo da litologia “ia”, de densidade 3,25 ton/m³ e teor de minério de 45%. A Z2 da litologia ‘gnf’, de densidade 2,0 t/m³ e teor de minério de 0%. Sendo assim, suas massas serão de, respectivamente, 81,25 e 50,00 toneladas [t].

Como Z1 tem um teor de minério maior que 30% e menor que 52%, ela é classificada como minério pobre e o seu valor de recuperação é de 60% (Tabela 3.2). Sendo assim, o valor do seu benefício será de:

$$\begin{aligned} \text{Benefício}_{Z1} &= 81,25 \times 0,45 \times 0,60 \times (80,00 - 20,00) \\ &\quad - 81,25 \times (3,00 + 6,00) \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{Benefício}_{Z1} = 1.316,25 - 731,25 \quad (3.5)$$

$$\text{Benefício}_{Z1} = 585,00 \text{ dólares} \quad (3.6)$$

No entanto, Z2 é classificada como estéril, pois seu teor é menor que 30%. Sendo assim, Z2 não terá valor de receita:

$$\text{Benefício}_{Z2} = - 50,00 \times (3,00 + 6,00) \quad (3.7)$$

$$\text{Benefício}_{Z2} = - 450,00 \text{ dólares} \quad (3.8)$$

Esses valores do Benefício_{Z1} e do Benefício_{Z2} serão carimbados em Z1 e em Z2, respectivamente. Esses cálculos são realizados e carimbados em cada zona do modelo, com o intuito de facilitar a contabilização do benefício total de uma cava. Ou seja, na modelagem o momento que for feita a escavação com uma determinada angulação, as zonas retiradas serão contabilizadas. Essa escavação será melhor detalhada nos tópicos a seguir.

3.2.3. Superfície de resposta

Uma superfície de resposta, também, chamada de meta-modelo pretende reproduzir o comportamento de um modelo computacional que pode levar horas ou até dias em tempo de processamento computacional para ser solucionado. Ou seja, meta-modelos são aproximações dos resultados de uma simulação que transforma parâmetros da entrada em parâmetros de saída (Sudret, 2012).

Ainda, segundo Sundret (2012), a grande maioria dos métodos computacionais associados à segurança estrutural e a quantificação da incerteza depende de chamadas repetidas ao modelo computacional subjacente da estrutura ou sistema. Por exemplo, a simulação de Monte Carlo baseia-se na amostragem dos parâmetros de entrada de acordo com sua distribuição e na avaliação da resposta do modelo para cada realização. Para previsões precisas, são necessárias muitas chamadas, não sendo adequado modelos computacionais como, por exemplo, em modelos de diferenças finitas pelo FLAC^{3D}.

Para enfrentar tal desafio, técnicas de meta-modelagem têm sido usadas e aplicadas frequentemente, tornando acessível a realização de uma simulação de Monte Carlo de grande porte em estruturas mecânicas complexas.

De acordo com Montgomery e Runger (2003), pode-se definir a Superfície de Resposta como sendo a representação geométrica obtida quando uma variável resposta é plotada como uma função de dois ou mais fatores quantitativos. A resposta esperada pode ser assim definida:

$$E(Y) = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) = \eta \quad (3.9)$$

então:

$$\eta = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (3.10)$$

é chamada de superfície de resposta, em que: Y é a resposta (variável dependente); $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ são os fatores (variáveis independentes ou regressoras).

A ideia básica da metodologia de superfície de resposta (MSR) é considerar que existe uma relação entre as variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ e Y , que é desconhecida, mas que pode-se aproximar por uma relação polinomial, por exemplo, do tipo linear:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k \quad (3.11)$$

sendo β 's os coeficientes do modelo de regressão.

A expressão (3.11) é denominada modelo de primeira ordem de superfície de resposta ou modelo de regressão linear múltipla. Essas denominações levam consideração o grau máximo da ordem do polinômio, que nesse caso é 1 com o número de regressores maior que 1.

A partir desses conceitos, foi implementada uma rotina no FLAC^{3D} utilizando a console IPython, que usa uma linguagem de programação (Python) com bibliotecas eficientes e

de alto nível. Desta maneira, a criação da seção e o tratamento das variáveis aleatórias do problema puderam ser realizados por completo em Python e, conseqüentemente, o FLAC^{3D} foi utilizado apenas como uma função de performance implícita.

Para cada simulação no FLAC^{3D} as médias das variáveis aleatórias foram multiplicadas por um coeficiente gerado aleatoriamente, com exceção do ângulo de inclinação (ψ_f). Esse coeficiente multiplicador não teve a necessidade de seguir uma distribuição e variou de 0,5 até 1,5. A partir do meta-modelo construído para expressar uma função de estado/desempenho limite, simulações de Monte Carlo foram aplicadas para avaliar a probabilidade de falha.

3.2.4. Análise probabilística e otimização

Um arquivo em formato *.txt é gerado ao final das simulações realizadas pelo FLAC^{3D} possuindo: as variáveis aleatórias com seus valores de cada simulação, os resultados do FS, do benefício da cava e os coeficientes do modelo de regressão.

O intuito dessa parte da dissertação é otimizar o ângulo de inclinação através do lucro. Para isso, além do valor do benefício dessa cava, o valor do risco também é requerido. Essa relação pode ser observada na equação a seguir:

$$\text{Lucro} = \text{Benefício} - \text{Risco} \quad (3.12)$$

$$\text{Lucro} = \text{Benefício} - (p_f \times c_f) \quad (3.13)$$

Sendo o risco estimado em termos financeiros, através da quantificação da probabilidade de falha e dos custos associados à essa falha (Equação 2.47). Um total de 10.000 simulações de Monte Carlo via Python foram aplicadas ao meta-modelo para quantificar a probabilidade de falha de cada inclinação testada dentro de um determinado intervalo. Essas probabilidades irão validar o ângulo ótimo obtido pela função de lucro, visto que esse ângulo não pode ultrapassar os limites aceitáveis de P_f .

Para cálculos do efeito do custo na otimização, foi realizada uma análise de sensibilidade, sendo considerado três cenários: primeiro com custo de falha baixo, segundo com um custo moderado e o terceiro com um custo alto.

As estruturas a nível de inter-rampa e banco foram analisadas com abordagens determinísticas e probabilísticas, através de métodos analíticos. O objetivo da abordagem analítica será detalhada no tópico a seguir, como também as abordagens determinísticas e probabilísticas.

3.3. ABORDAGEM ANALÍTICA

Já é de comum utilização no mercado geotécnico alguns programas computacionais para cálculos de estabilidade de taludes através de metodologias analíticas. Dentro do contexto de materiais rochosos o pacote da *RocScience* é muito utilizado, abrangendo programas como: O *RocPlane* 3.0 (Rocscience, 2016b), *Swedge* 6.0 (Rocscience, 2014a) e *RocTopple* 1.0 (Rocscience, 2014b) que realizam análises de estabilidade, respectivamente para ruptura planar, em cunha e tombamento por blocos, tanto deterministicamente quanto probabilisticamente.

No entanto esses programas da *RocScience* são independentes e não oferecem a função de retornar o ângulo ótimo do talude que é o objetivo desta dissertação. Sendo assim, para as análises a nível de inter-rampa e banco, utilizando metodologias analíticas, foi necessário o desenvolvimento de um *software* que fizesse a otimização da inclinação dessas estruturas. Além da otimização o *software* foi preparado para fazer análises cinemáticas e cinéticas dos três modos de ruptura diferentes em um só programa, abrangendo resultados determinísticos e probabilísticos. Os programas existentes no mercado de análise de estabilidade serviram para a validação e calibração dos resultados obtidos.

Dentro das várias linguagens de programação existentes, decidiu-se recorrer ao Python por ser uma ferramenta de cálculo extremamente atual e gratuita, com grande potencialidade no que diz respeito a existência de bibliotecas, dotadas de funções

auxiliares muito úteis na fase de elaboração do programa. A sua programação orientada a objetos encapsula dados, chamados atributos, dentro de funções que se chamam classes. Usando esse tipo de orientação a objetos que foram salvos os atributos de cada talude.

O ProBench foi desenvolvido no âmbito dessa dissertação com a implementação de dois métodos de resistência: Mohr-Coulomb e Barton-Bandis. O *software* não calcula valorizações (benefício) do material escavado, sendo assim, a otimização das estruturas foram feitas através do FS de projeto.

O ProBench foi programado para ler um arquivo de entrada, realizar os cálculos necessários e salvar um arquivo de saída com os resultados de interesse. O fluxograma (Figura 3.5) mostra de forma geral as fases que o ProBench executa. O FS de cada modo de ruptura é realizado dado um ângulo inicial. A partir de um valor de projeto para FS, considerado ideal para ser praticado na estrutura, a otimização é feita. Finalmente a probabilidade de falha é calculada, pelo método de Monte Carlo, considerando o ângulo ótimo.

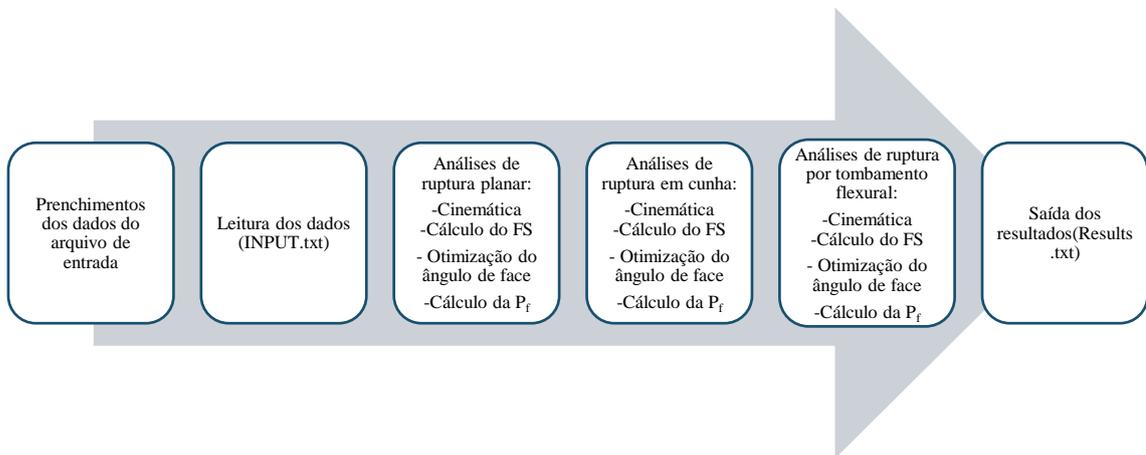


Figura 3.5 – Fluxograma geral da execução do ProBench para nível de inter-rampa e banco

A probabilidade de falha pode ser utilizada na análise de risco das inter-rampas e dos bancos. O resultado do risco que essas estruturas representam ($Risco_{local}$) pode ser somado ao risco global e conseqüentemente influenciar a função de lucro, como pode ser observado pela relação:

$$\text{Lucro} = \text{Benefício} - (\text{Risco}_{\text{Global}} + \text{Risco}_{\text{local}}) \quad (3.14)$$

3.3.1. Entrada e saída de dados

Uma das questões é a forma de introduzir dados para, posteriormente, prever o que estaria para ser lido pelo programa. Logo, optou-se por criar um arquivo em formato e denominado “INPUT.txt”, devidamente formatado para ser lido pelo programa em Python. Neste arquivo constam *inputs* acerca de:

- Critério de falha a ser utilizado;
- Densidade da água;
- Parâmetros das juntas existentes;
- Litologias presentes;
- Divisão da mina em domínios estruturais;
- Número de taludes com seus devidos parâmetros.

Para a determinação de potenciais modos de falha dos taludes, esse arquivo deve ser preenchido corretamente. Para tornar o preenchimento mais intuitivo e facilitado, deve-se começar com a divisão da mina em domínios geotécnicos, que consiste em dividir o modelo geotécnico em áreas com características geológicas, estruturais e materiais similares.

Após o preenchimento desse arquivo de entrada o usuário precisa ter em seu computador um depurador para a linguagem Python. Dentre os existentes no mercado foi escolhido o Spyder (Python 2.7), que é um poderoso ambiente de desenvolvimento interativo para a linguagem Python, com recursos avançados de edição, testes interativos, depuração e introspecção.

Os resultados são salvos e expressos em um arquivo chamado “Results.txt”. Nesse ficheiro constam "outputs" acerca de:

- Modo de ruptura avaliado;
- Talude correspondente;
- Junta correspondente;
- Fator de segurança do ângulo inicial;
- Ângulo ótimo;
- Probabilidade de falha do ângulo ótimo.

O ProBench não tem limite de taludes a serem analisados, sendo imposto pelo usuário quantos forem necessários. No Apêndice I consta um breve tutorial onde será feita, ao leitor, a descrição da inserção de dados no arquivo de entrada até à exibição dos resultados.

3.3.2. Modos de ruptura

O ProBench analisa automaticamente a possibilidade de três modos de ruptura: planar, em cunha e tombamento flexural. A escolha do critério de ruptura está entre duas opções: Mohr-Coulomb ou Barton-Bandis. A utilização de Barton-Bandis está sujeita a geração dos parâmetros equivalentes (coesão e atrito) de Mohr-Coulomb, pois os cálculos dos FS são baseados nos parâmetros do critério de Mohr-Coulomb.

A partir do preenchimento dos dados de entrada, o ProBench avaliará para cada talude todas as juntas que fizerem parte do mesmo. Sendo assim, de suma importância uma investigação de campo completa e precisa.

Para rupturas planares o ProBench analisará as juntas uma de cada vez, ou seja se foi informado que um talude tem três juntas ele gerará três resultados, um para cada junta. Em rupturas por tombamento as análises das juntas, também são feitas uma a uma. Para formar a cunha é necessário duas ou mais juntas, sendo assim, caso exista só uma junta o programa retornará um código significando que a falha por esse modo de ruptura é improvável. Quando o talude tiver duas ou mais juntas a programação fará a combinação entre elas para analisar a ruptura por cunha.

3.3.3. Otimização e análise probabilística

Um otimizador foi criado através de análises de sensibilidade variando o ângulo de face do talude dentro de um intervalo. Após analisar todos os ângulos pré-definidos e salvar os resultados do FS foram realizadas algumas manobras para encontrar a solução ótima referente ao FS de projeto. Logo, algumas foram realizadas para determinadas situações:

1° - Quando o ângulo máximo (90°) resulta em um fator de segurança maior que o *FS* de projeto.

- Isso ocorre quando o talude mesmo a 90° está seguro quanto ao modo de ruptura que estiver sendo avaliado, e assim o ângulo ótimo retornado será 90°.

2° - Quando todos os ângulos são avaliados e nenhum dos FS dão valores igual ou maiores que o FS de projeto.

- Isso ocorre quando o FS desse talude é muito baixo para o modo de ruptura que estiver sendo avaliado, indicando alta instabilidade.
- Para essa situação foi recomendado o corte do talude no valor do ângulo mínimo, ou seja, tirando a possibilidade que ele se rompa.

O ângulo mínimo para rupturas planares é o mergulho da junta que estiver sendo testada. Para rupturas em cunha, o ângulo mínimo é o mergulho da interseção das duas juntas que estiverem sendo avaliadas. Já em tombamento foi considerado ângulo mínimo quando o talude fica perpendicular à junta (90° - mergulho da junta). Para todos os três métodos de ruptura o ângulo máximo é de 90°.

Para as análises probabilísticas foi utilizada a simulação de Monte Carlo onde as variáveis simuladas foram: ângulo de atrito, coesão e peso específico da litologia. Uma vez que não há conhecimento sobre a distribuição dessas variáveis, o ProBench as assume como normal e utiliza os coeficientes de variação, da média e do desvio padrão, como indicados na Tabela 2.1.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO GLOBAL DO TALUDE

4.1. ROTINAS IMPLEMENTADAS

As implementações de rotinas foram necessárias para otimizar o ângulo global da mina estudada. Rotinas de acoplamento FLAC3D/Python geraram um meta-modelo, usando modelagem numérica (Figura 4.1), posteriormente somente em Python foram realizadas as simulações de Monte Carlo e a otimização com base no lucro.

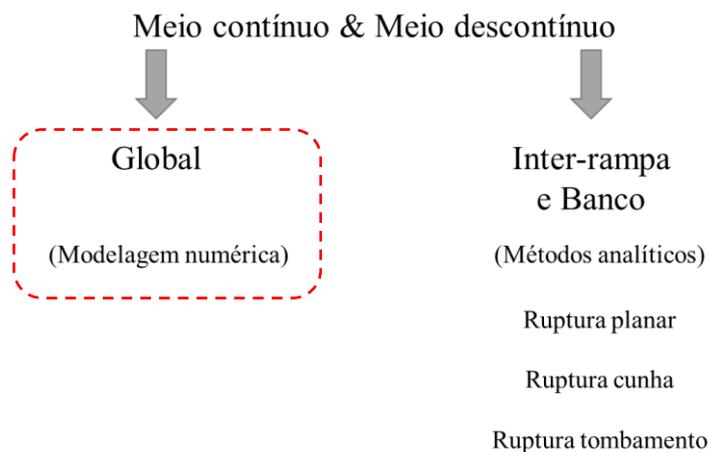


Figura 4.1 – Fluxograma destacando a metodologia utilizada a nível global.

A partir da consolidação da base de dados e da criação do modelo numérico, foi gerado um meta-modelo de acordo com a rotina representada pelo fluxograma da Figura 4.2.

A estrutura de repetição utilizada executou 100 simulações ($N = 100$), tendo como contador a variação do ângulo de inclinação do talude. O ângulo de inclinação variou de forma crescente de um valor mínimo (ang_{\min}) até um valor máximo (ang_{\max}), onde o intervalo numérico (passo) respeitou a seguinte equação (4.1):

$$\text{passo} = \frac{\text{ang}_{\max} - \text{ang}_{\min}}{N} \quad (4.1)$$

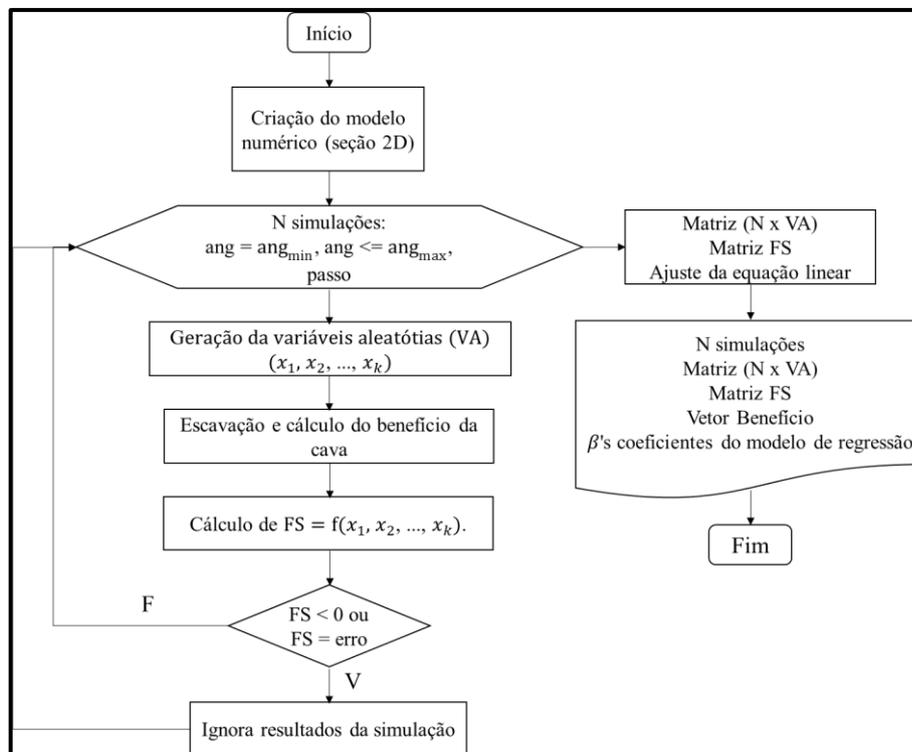


Figura 4.2 – Fluxograma da rotina para geração do meta-modelo

A partir das litologias, presentes na seção, e os seus respectivos critérios de resistência, foram escolhidas as variáveis aleatórias. O nível da água também foi considerado como uma variável aleatória. São modeladas como variáveis aleatórias, de acordo com cada critério de resistência:

- Mohr-Coulomb: c e ϕ do maciço.
- Hoek-Brown: a , m_b e s do maciço.
- Junta oblíquas: c e ϕ do maciço e c e ϕ da foliação.

O primeiro passo para realizar a escavação é o reconhecimento da linha que divide as zonas chamadas de talude e lavra (Figura 4.5), podendo ser chamada de superfície topográfica alvo. Essa superfície irá variar de acordo com o ângulo de inclinação que estiver sendo avaliado e as zonas que forem nomeadas como “lavra” serão as escavadas.

O processo de lavra, em si, foi simulado como uma escavação com alívio progressivo. Isto quer dizer que tanto a rigidez quanto a densidade e tensões do material a ser escavado são reduzidas gradualmente até atingir o valor nulo para um determinado número de passos de cálculo, após este processo o benefício e o fator de segurança da cava são requeridos.

As práticas de drenagem subterrânea da mina, fazem com que o nível da água fique em média 15 metros de distância do fundo e da face da cava. A modelagem do NA seguiu essa premissa, impedindo o afloramento da água pelo talude. Como pode ser observada na Figura 4.3:

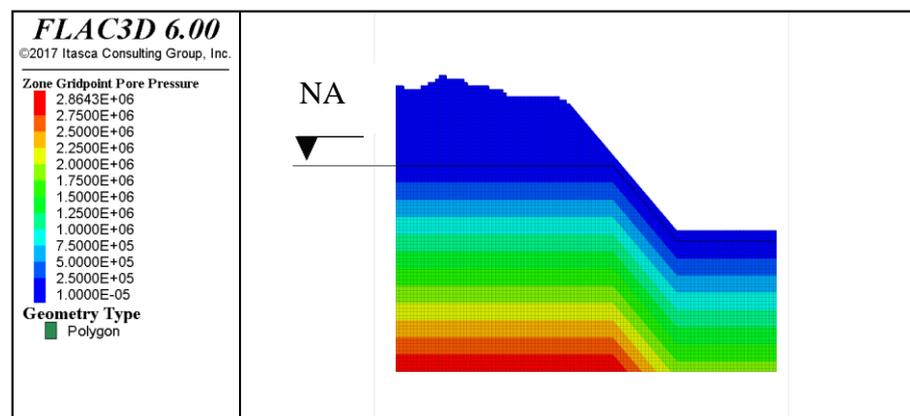


Figura 4.3 – Distribuição das poropressões geradas pelo nível da água na seção

A rotina programada pela console IPython no FLAC^{3D} foi feita para realizar 100 simulações, no entanto se algo acontecer de inesperado na simulação corrente, como por exemplo $FS < 0$, essa simulação será excluída. O fator de segurança da seção foi calculado considerando, ao mesmo tempo, os três critérios de resistência (MC, HB e UJ).

Para a obtenção do modelo de regressão linear múltipla (polinômio linear) utilizou-se uma função da biblioteca Numpy (“Numpy.linalg.lstsq”, 2017). A qual, retorna os coeficientes β 's do modelo de regressão, através da solução por mínimos quadrados.

Uma rotina para fazer simulações de Monte Carlo sobre o meta-modelo foi implementada em Python. O nível da água foi fixado, mantendo uma altura pré-determinada. As fases seguiram o fluxograma da Figura 4.4.

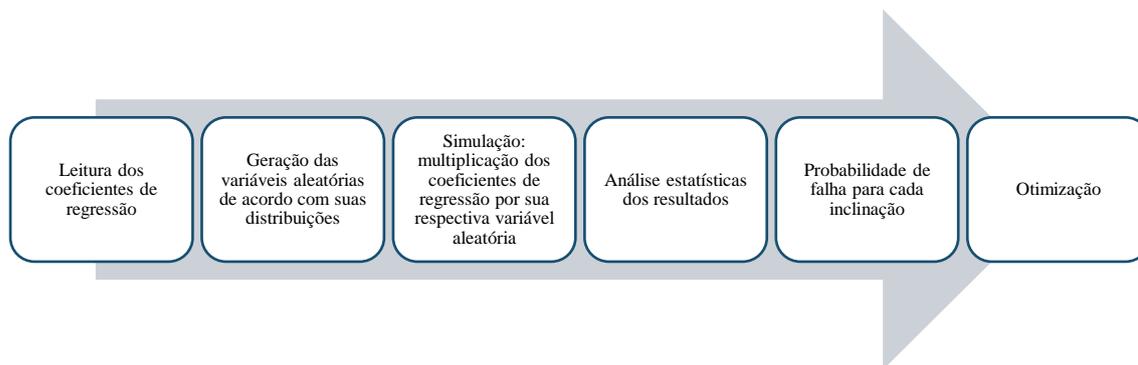


Figura 4.4 – Fases utilizadas para implementação do método de Monte Carlo em Python.

O ângulo de inclinação variou de um valor mínimo (31°) a até um valor máximo (70°) e a probabilidade de falha foi calculada para cada ângulo de acordo com a manipulação estatística dos dados gerados pela simulação de Monte Carlo. Tendo o valor da probabilidade de falha, risco e benefício para cada ângulo, finalmente a otimização baseada no lucro pôde ser realizada.

4.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Retirar uma seção 2D do modelo numérico 3D, no próprio FLAC^{3D}, diminuiu para 7.670 o total de zonas. O tempo de execução necessário, para rodar um fator de segurança dessa seção foi de, aproximadamente, 20 minutos. Este resultado demonstra uma importante redução no tempo de resolução, em relação ao modelo 3D, o que possibilitou as análises probabilística e a otimização baseada no lucro.

A Figura 4.6 mostra a geometria da seção escolhida com uma altura de aproximadamente 200 m e com uma grade cúbica regular de 5 m, criada pela rotina no FLAC^{3D}. O talude foi inicialmente criado com uma inclinação de 36° , para que a posterior variação automática desse ângulo seja feita através dessa variável de entrada (Figura 4.5).

Como pode ser visto na figura, a seção foi limitada de acordo com o fundo da cava. Antes de ser feita a análise de estabilidade, as zonas demarcadas em vermelho serão escavadas e contabilizadas como o benefício da cava.

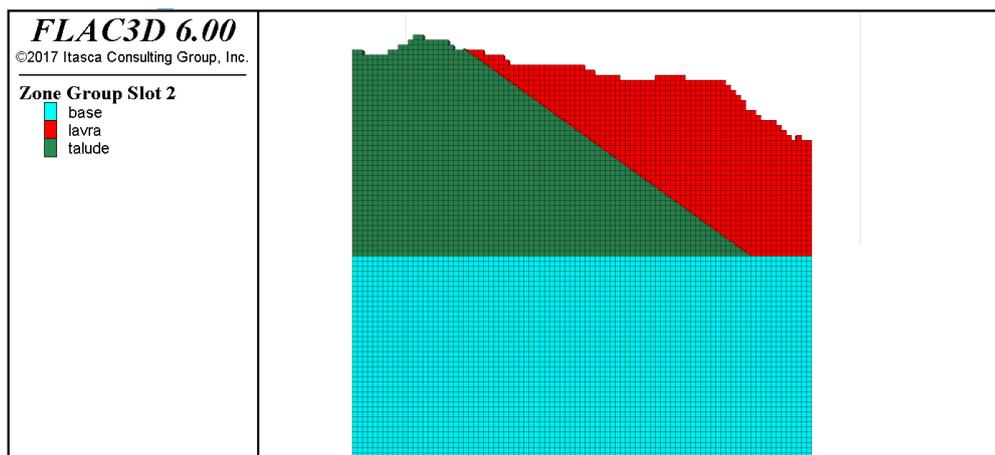


Figura 4.5 – Geometria da seção escolhida antes da escavação

Os exemplos a seguir mostram algumas características que foram copiadas do modelo de blocos para a seção 2D: litologia e modelo constitutivo (Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente).

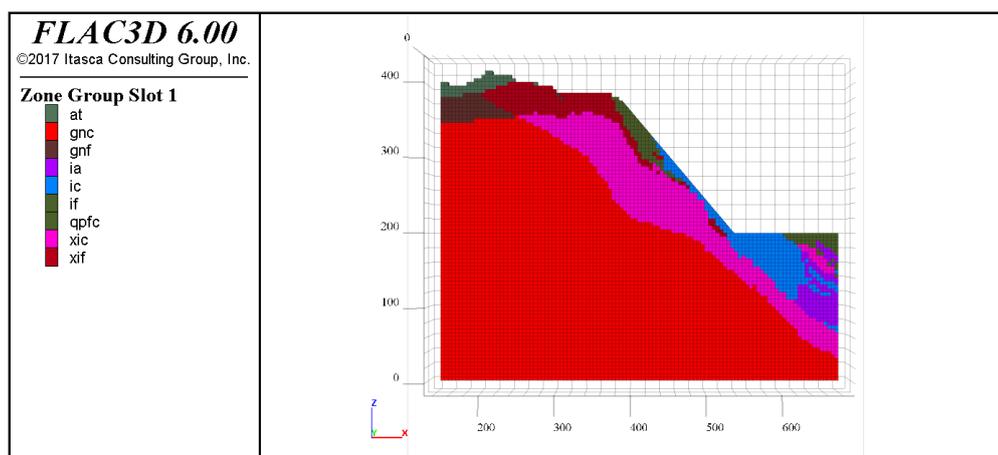


Figura 4.6 – Seção escolhida já escavada, com as litologias e distâncias em metros

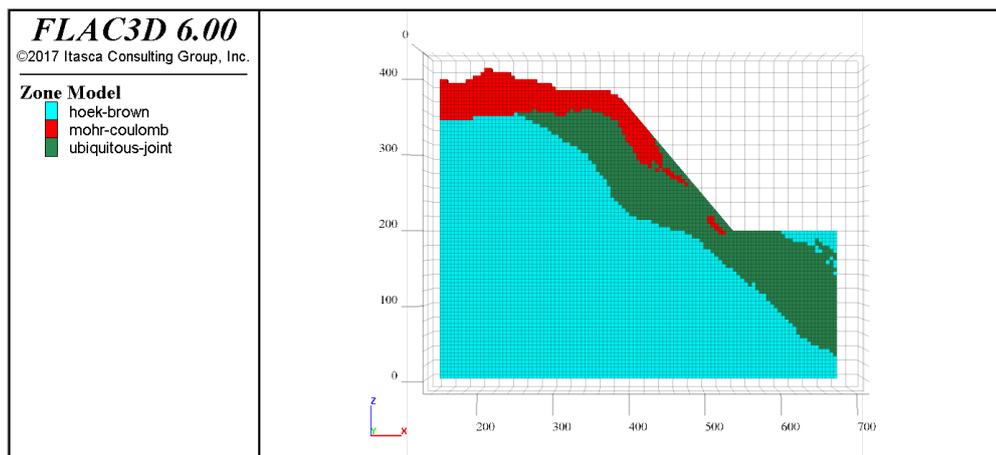


Figura 4.7 – Seção escolhida carimbada com os modelos constitutivos

Os gráficos abaixo apresentam os resultados obtidos pelos *software* RocData aplicado aos dados dos ensaios de laboratório para as litologias ‘qpf_c’ (Figura 4.8 a), ‘ic’ e ‘ia’ (Figura 4.8b), ‘xic’ (Figura 4.9 a) e ‘gnc’ (Figura 4.9 b).

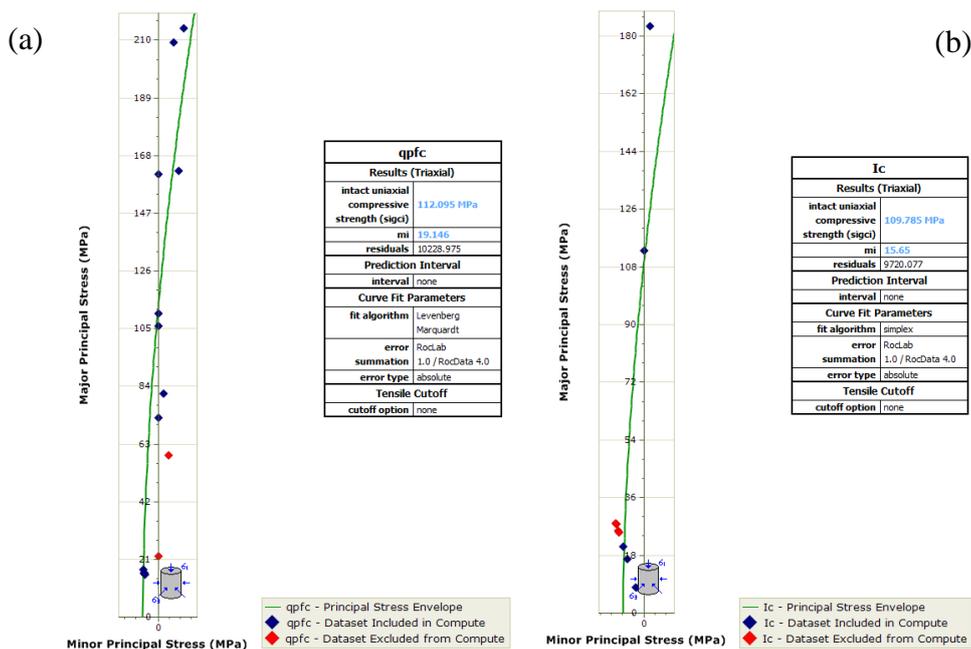
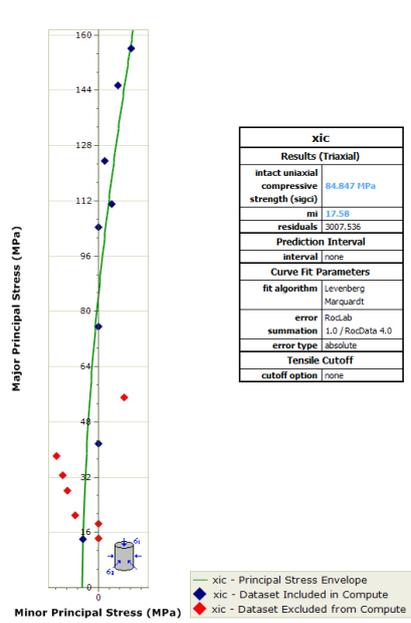


Figura 4.8 – Ensaio de laboratório interpretados segundo o critério de Hoek-Brown generalizado: (a) Litologia ‘qpf_c’; (b) Litologia ‘ic’.

(a)



(b)

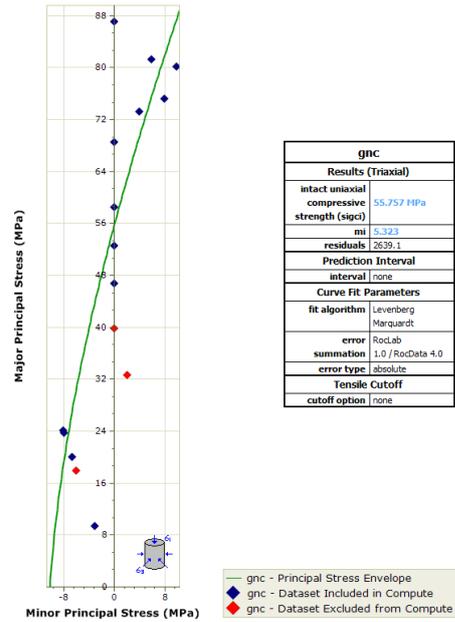


Figura 4.9 – Ensaio de laboratório interpretados segundo o critério de Hoek-Brown generalizado: (a) Litologia ‘xic’; (b) litologia ‘gnc’.

Tabela 4.1 – Base de dados consolidada

ID	Litologia	Critério	Densidade [kg/m ³]	Parâmetros	m	σ^{**}	Ei* (GPa)	
1	qpff	MC	2000	Maciço	\emptyset	32,00*	3,20	
					c	0,30*	0,12	
2	qpfc	HB	2333	Rocha intacta	GSI	45,98**	15,62	
					m _i	19,20**	1,65	
					σ_{ci}	112,10**	8,53	
					a	0,51**	0,01	
					Maciço	m _b	5,10**	2,92
		s	0,04**	0,09				
3	if	MC	3000	Maciço	\emptyset	33,00*	3,30	
					c	0,08*	0,03	
4/5	ic/ia	UJ	3250	Rocha intacta	GSI	52,00**	15,48	
					m _i	15,64**	5,38	
					σ_{ci}	109,68**	32,64	
					Maciço	\emptyset	34,38*	5,78
						c	6,81*	3,18
		Foliação	\emptyset_{fol}	31,90*	3,19			
			c _{fol}	2,00*	0,80			
6	xif	MC	2000	Maciço	\emptyset	33,00*	3,30	
					c	0,04*	0,02	
7	xic	UJ	2467	Rocha intacta	GSI	58,48**	14,77	
					m _i	17,58**	2,04	
					σ_{ci}	84,85**	6,73	
					Maciço	\emptyset	37,77*	4,40
						c	5,89*	1,64
		Foliação	\emptyset_{fol}	32,40*	3,24			
			c _{fol}	1,60*	0,64			
8	gnf	MC	2000	Maciço	\emptyset	25,00*	2,50	
					c	0,30*	0,12	
9	gnc	HB	2333	Rocha intacta	GSI	51,18**	20,83	
					m _i	5,32**	1,17	
					σ_{ci}	55,76**	4,27	
					Maciço	a	0,52**	0,02
						m _b	1,18**	0,92
		s	0,03**	0,09				
10	at	MC	1800	Maciço	\emptyset	37,00*	3,70	
					c	0,004*	0,002	

Unidades: σ_{ci} (MPa), c (MPa) e \emptyset (°)

*Fornecido pela empresa

**Estimado

A consolidação da base de dados da mina estudada gerou a Tabela 4.1 que foi composta de informações prévias, de acordo com a experiência dos geotécnicos da mina, ensaios de laboratório em rocha intacta e, quando necessário, parâmetros estimados.

As zonas vermelhas, indicadas na Figura 4.8 e na Figura 4.9 foram desconsiderados das análises. Os critérios para a exclusão de alguns pontos variaram desde a invalidade do resultado do ensaio por motivos de rompimentos incorretos ou valores discrepantes e incoerentes, até a avaliação crítica dos engenheiros geotécnicos e da dissertante.

A função de ajuste que foi criada em Python, teve como resultado os mesmos valores de m_i e s_{ci} obtidos pelo RocData, validando os resultados desse ajuste. Sendo assim, os valores do desvio padrão dessas variáveis, também obtidos pela rotina, foram os já preenchidos na Tabela 4.1.

Um *boxplot* (gráfico de caixa), utilizado para avaliar e mostrar a distribuição empírica dos valores do GSI para algumas litologias, pode ser observado na Figura 4.10. Todas as quatro litologias, avaliadas por esse tipo de gráfico, tiveram uma grande variação. O valor das medianas (linhas amarelas) ficaram bem próximas das médias (pontos azuis) e somente a litologia ‘xic’ indicou um valor discrepante em seus dados.

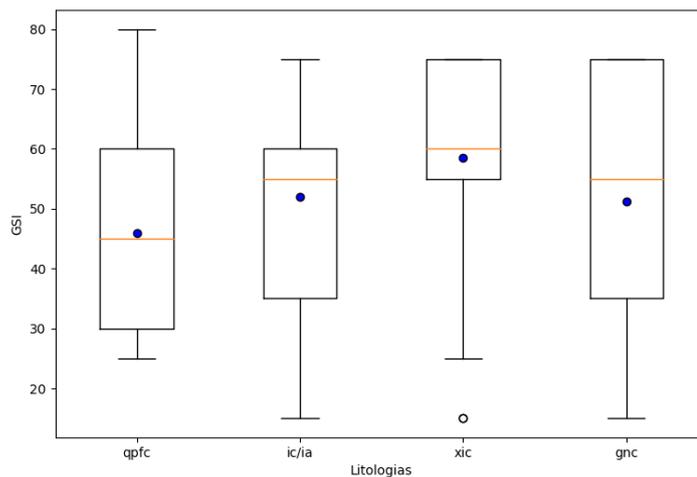


Figura 4.10 – Gráfico boxplot mostrando a variabilidade do GSI por litologia

A Figura 4.11 mostra como ficou a seção após a aplicação de teores de minério de ferro para cada litologia. As zonas verdes correspondem às litologias com 45% de teor de ferro

e a azuis às litologias com 0% de teor de ferro. O valor do benefício de cada zona individualmente não teve importância inicialmente, pois o valor do benefício é o volume total escavado. O exemplo (Figura 4.12) mostra umas das inclinações praticadas e sua geometria escavada.

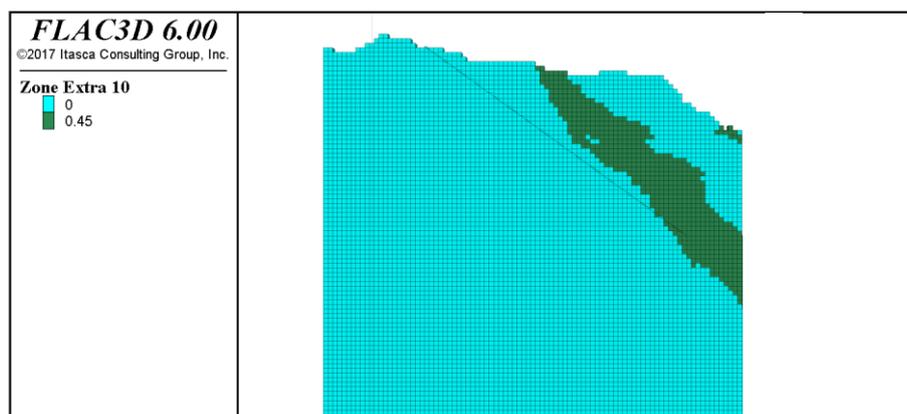


Figura 4.11 – Seção escolhida carimbada com os teores por zona antes da escavação

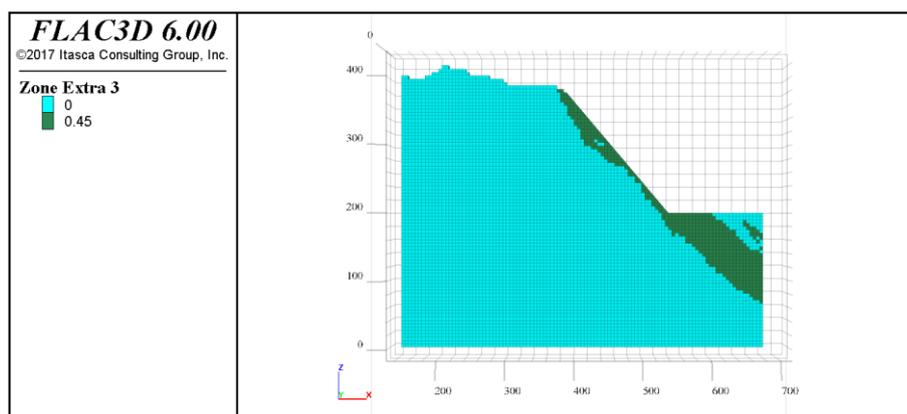


Figura 4.12 – Talude escavado para análise de estabilidade e benefício da cava

Para a criação do meta-modelo, a seção 2D escolhida foi modelada tendo como variáveis aleatórias: o ângulo de inclinação do talude, o nível da água (NA) e os parâmetros de resistência de acordo com o respectivo critério de ruptura. Sendo assim, a seção foi modelada com um total de 30 variáveis aleatórias. A Tabela 4.2 mostra quais variáveis foram modeladas como aleatórias e o intervalo que cada uma variou.

O coeficiente aleatório multiplicador das variáveis aleatórias ficou entre 0,5 e 1,5. Os parâmetros que têm restrições passaram por uma verificação para que seus valores não

fossem incoerentes. Por exemplo: o parâmetro ‘a’ de Hoek-Brown deve ter valores acima de 0,5 e essa particularidade foi respeitada. A nomenclatura utilizada para as variáveis aleatórias seguiu o seguinte formato: ‘parâmetro_litologia’. Os valores médios das VA podem ser consultados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Representação das 30 variáveis aleatórias e seus intervalos de variação.

Nº	VA	Mínimo	Máximo	Nº	VA	Mínimo	Máximo
1	ψ_f [°]	31,00	69,61	16	s_gnc	0,00181	0,00516
2	NA [m]	786,04	989,99	17	\emptyset_{gnf} [°]	12,60	37,40
3	\emptyset_{xic} [°]	18,71	50,48	18	c_gnf [MPa]	0,05	0,15
4	c_xic [MPa]	2,41	7,09	19	\emptyset_{at} [°]	18,56	54,87
5	\emptyset_{fol_xic} [°]	14,13	41,69	20	c_at [MPa]	0,52	1,49
6	cfol_xic [MPa]	0,81	2,40	21	\emptyset_{ia} [°]	21,49	62,57
7	\emptyset_{xif} [°]	19,14	56,63	22	c_ia [MPa]	5,36	15,60
8	c_xif [MPa]	0,16	0,45	23	\emptyset_{fol_ia} [°]	14,15	41,96
9	a_qpfc	0,51	0,76	24	cfol_ia [MPa]	1,02	2,94
10	mb_qpfc	1,57	4,43	25	\emptyset_{ic}	18,69	53,96
11	s_qpfc	0,00219	0,00649	26	c_ic [MPa]	4,10	11,79
12	\emptyset_{qpff} [°]	20,52	61,45	27	\emptyset_{fol_ic} [°]	14,62	41,67
13	c_qpff [MPa]	0,05	0,15	28	cfol_ic [MPa]	1,00	3,00
14	a_gnc	0,51	0,77	29	\emptyset_{if} [°]	19,71	58,13
15	mb_gnc	0,40	1,17	30	c_if [MPa]	0,05	0,15

A programação foi feita para execução de 100 simulações; porém, dentre elas, foram excluídas 11, sobrando um total de 89 simulações. Com base no resultado dessas 89 simulações, com o ângulo de inclinação variando de 31° a 69,61°, o modelo de regressão foi desenvolvido para prever o FS transcrito pela Equação (4.2).

$$\begin{aligned}
 FS = & 5,654 - 0,052\psi_f - 0,004NA + 0,002\emptyset_{xic} + 0,121c_{xic} - 0,010\emptyset_{fol_xic} \\
 & - 0,184c_{fol_xic} + 0,004\emptyset_{xif} + 0,086c_{xif} - 0,239a_{qpfc} \\
 & - 0,003m_{b_qpfc} + 6,661s_{qpfc} + 0,001\emptyset_{qpff} - 1,241c_{qpff} \\
 & - 1,487a_{gnc} + 0,442m_{b_gnc} + 79,126s_{gnc} + 0,021\emptyset_{gnf} \\
 & - 1,199c_{gnf} + 0,002\emptyset_{at} + 0,548c_{at} + 0,008\emptyset_{ia} \\
 & + 0,022c_{ia} + 0,004\emptyset_{fol_ia} + 0,029c_{fol_ia} - 0,005\emptyset_{ic} \\
 & - 0,012c_{ic} + 0,010\emptyset_{fol_ic} - 0,165c_{fol_ic} + 0,017\emptyset_{if} \\
 & + 4,099c_{if}
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

A superfície de resposta referente a Equação 4.2, representa o comportamento mecânico da seção escolhida. A manipulação dessa equação propiciou análises mais rápidas das probabilidades de ruptura e da otimização da inclinação.

O arquivo em formato *.txt que é gerado ao final das simulações no FLAC^{3D} foi editado e exposto, por questões de tamanho e organização, no Apêndice II. Ainda no Apêndice II são exibidas as matrizes a e b utilizadas como parâmetro de entrada da função Numpy.linalg.lstsq, a qual utilizou uma solução por mínimos quadrados para resultar os coeficientes β 's da Equação 4.2.

Com a valorização das cavas por angulação, já se tem o resultado de um ângulo ótimo considerando apenas o maior valor de benefício (Figura 4.13). No entanto, como o intuito dessa dissertação é otimizar o ângulo de inclinação através do lucro, foram necessários os cálculos da probabilidade de falha (Figura 4.14) e dos custos de falha.

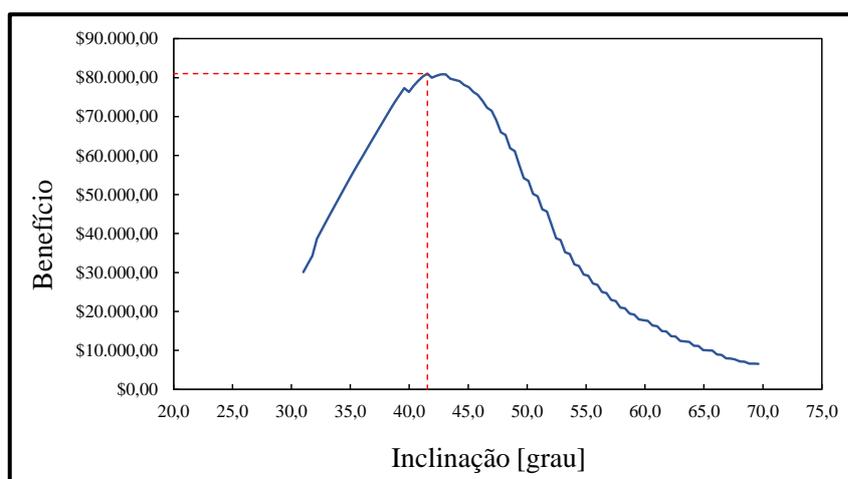


Figura 4.13 – Gráfico do ângulo de inclinação ótimo, considerando o valor máximo do benefício da cava

De acordo com o gráfico (Figura 4.13), o valor máximo do benefício é de \$ 81.000,00 (dólares) para um ângulo ótimo de 41,5°.

Para as simulações de Monte Carlo, o nível da água no meta-modelo foi considerado uma variável de projeto, fixado em uma cota de 850 m. Essa hipótese manteve o talude em uma situação intermediária de cheia e/ou problemas com drenagens. Sendo assim, as

simulações mostraram que a partir de 31,0° de inclinação já começam a surgir probabilidades de ruptura da seção e que as probabilidades são diretamente proporcionais a inclinação do talude, tendo altas probabilidades em angulações acima de 35° (Figura 4.14).

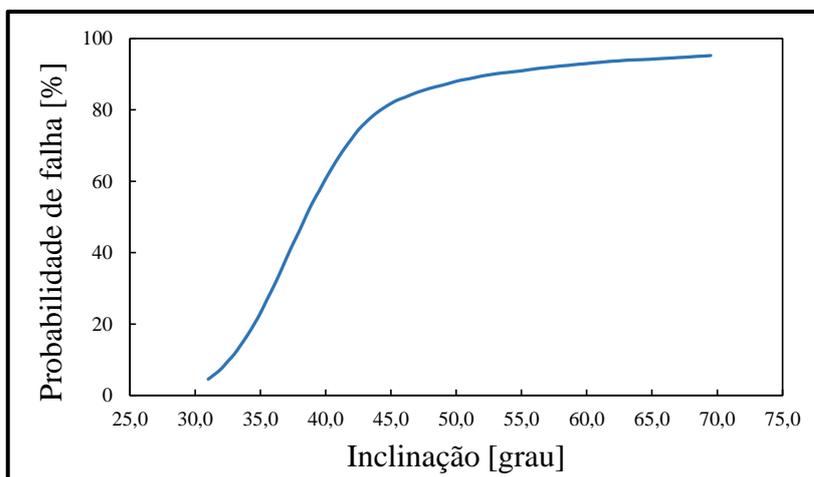


Figura 4.14 – Probabilidade de falha das inclinações simuladas

Os custos de falha foram utilizados para uma análise de sensibilidade: custo de falha considerado alto de \$200.000,00, um considerado moderado de \$100.000,00 e um de valor baixo \$50.000,00. Sendo assim, com a mesma probabilidade de falha foram geradas três curvas de risco, uma para cada custo de falha (Figura 4.15).

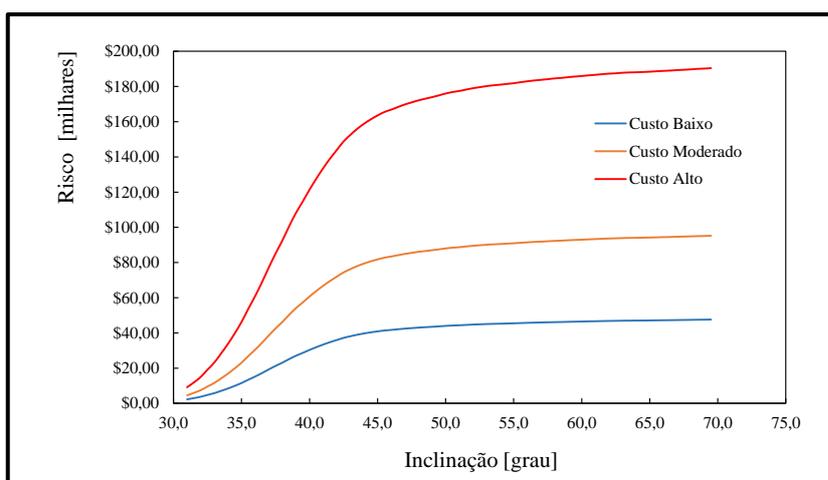


Figura 4.15 – Valor do risco para cada inclinação, a partir de valores de custos diferente

Como pode ser observado no gráfico da Figura 4.15, as três curvas de risco têm uma estabilidade em seus valores de risco entre 40° e 45°. Os valores do risco se mostraram proporcionais aos valores dos custos de falha. Essas diferenças nos valores do risco irão influenciar diretamente as curvas de lucro (Figura 4.16).

A partir das curvas de lucro e do valor máximo que a otimização da inclinação é inicialmente obtida. As curvas de lucro tiveram diferenças consideráveis, principalmente quando alcançam valores negativos. Para o cenário de custo de falha alto, a inclinação ótima foi de 32,0°. O cenário de custo de falha moderado, foi obtido um ângulo ótimo de 34,0° e para o custo baixo de falha a inclinação ótima obtida foi de 39,5°.

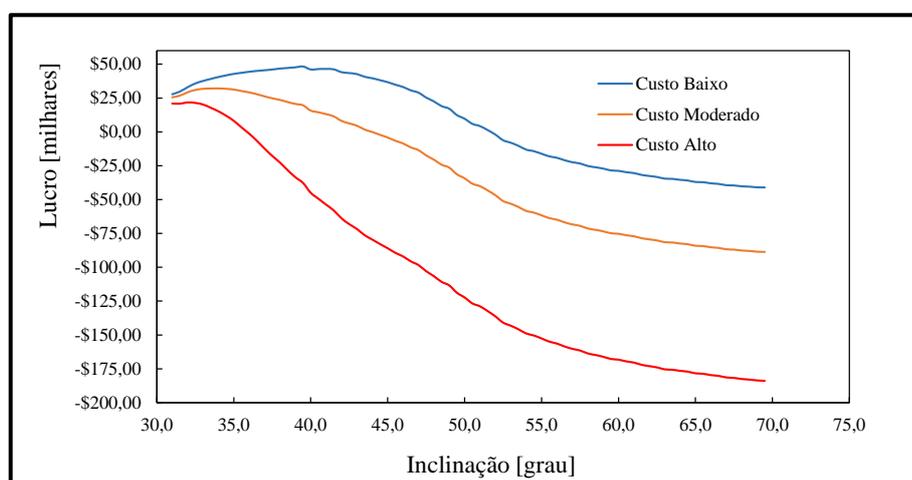


Figura 4.16 – Curva de lucro para diferentes valores de custo de falha

Finalmente, essas inclinações ótimas foram analisadas quanto aos seus respectivos valores de probabilidade de falha, sendo expressos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados das probabilidades de falha para os ângulos ótimo obtidos

Custo de falha	Ângulo ótimo [°]	P _f [%]
Baixo	39,5	56,32
Moderado	34,0	16,87
Alto	32,0	7,49

De acordo com a Tabela 2.3 os valores típicos para probabilidade de falha de uma estrutura em escala global com custo de falha baixo, moderado e alto, respectivamente,

são: 20%, 10% e 5%. Sendo assim, esses ângulos ótimos foram reavaliados para também atenderem os critérios de P_f . Uma nova tabela foi então gerada, agora com valores válidos para as inclinações (Tabela 4.4). Neste novo cenário, os ângulos globais ótimos obtidos para a seção de estudo, por meio da análise de sensibilidade dos custos de falha foram de 31°, 32,5° e 34,5°.

Tabela 4.4 – Ângulos ótimos obtidos pela curva de lucro e valores limites para P_f

Custo de falha	Ângulo ótimo [°]	P_f [%]	Lucro [\$]
Baixo	34,5	19,86	41.734,50
Moderado	32,5	9,57	30.961,65
Alto	31,0	4,57	20.949,20

O ângulo ótimo escolhido para ser variável de projeto da mina pesquisada nesta dissertação foi o referente ao custo de falha moderado, ou seja, 32,5°. Observando que esse valor é bem coerente ao praticado pelo planejamento de mina a longo prazo.

Com as 100.000 simulações de Monte Carlo sobre o meta-modelo não foram necessários mais do que 0,5 minuto para que a rotina em Python fosse executada, gerando assim o resultado requerido. Observou-se com os cenários de custos de falha analisados, que quanto menor for o custo de falha maior poderá ser a inclinação praticada nessa seção, porém as validações dessas inclinações devem ser realizadas por meio de suas respectivas probabilidades de falha.

ANÁLISE DA ESTABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DO ÂNGULO DE FACE DE INTER-RAMPAS E BANCOS

5.1. ROTINAS IMPLEMENTADAS

A necessidade da criação de um *software* que fizesse a otimização das inclinações das inter-rampas e bancos da mina estudada, usando métodos analíticos (Figura 5.1), gerou o ProBench. O Python foi a linguagem de programação escolhida e sua utilização foi através do depurador Spyder (Python 2.7).

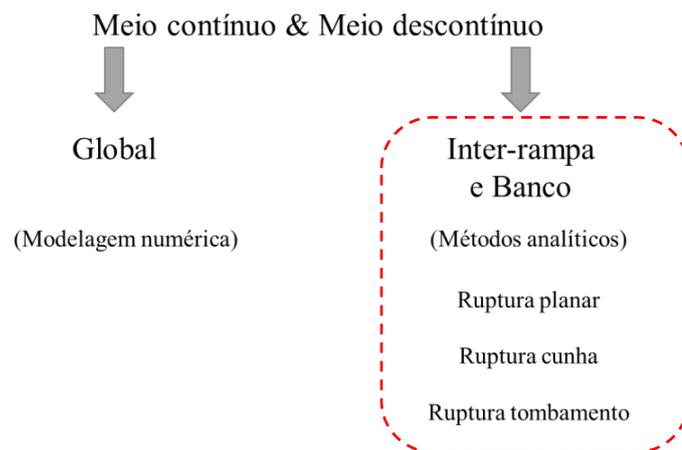


Figura 5.1 – Fluxograma das metodologias a nível global, inter-rampa e banco

As rotinas implementadas via Spyder (Python 2.7) fizeram desde a leitura do arquivo de entrada, até a saída dos resultados. O fluxograma geral da execução do ProBench pode ser consultado de acordo com a Figura 3.5, exposta anteriormente.

Para que a saída dos resultados fosse possível, as rotinas também avaliaram o fator de segurança (FS) da estrutura quanto á três modos de ruptura: planar, cunha e tombamento. Outras rotinas fizeram a otimização do ângulo de face, como também, a probabilidade de

falha do mesmo. Uma mesma rotina foi praticada para os três modos de ruptura (Figura 5.2), com apenas uma particularidade para o modo de ruptura em cunha.

A região circulada em vermelho na Figura 5.2 é um pouco modificada para o modo de ruptura em cunha. Nessa etapa do fluxograma, quando o talude tem duas ou mais descontinuidades, ele não testará uma por uma e sim duas a duas, fazendo a combinação entre todas existentes, caso tenham mais que duas.

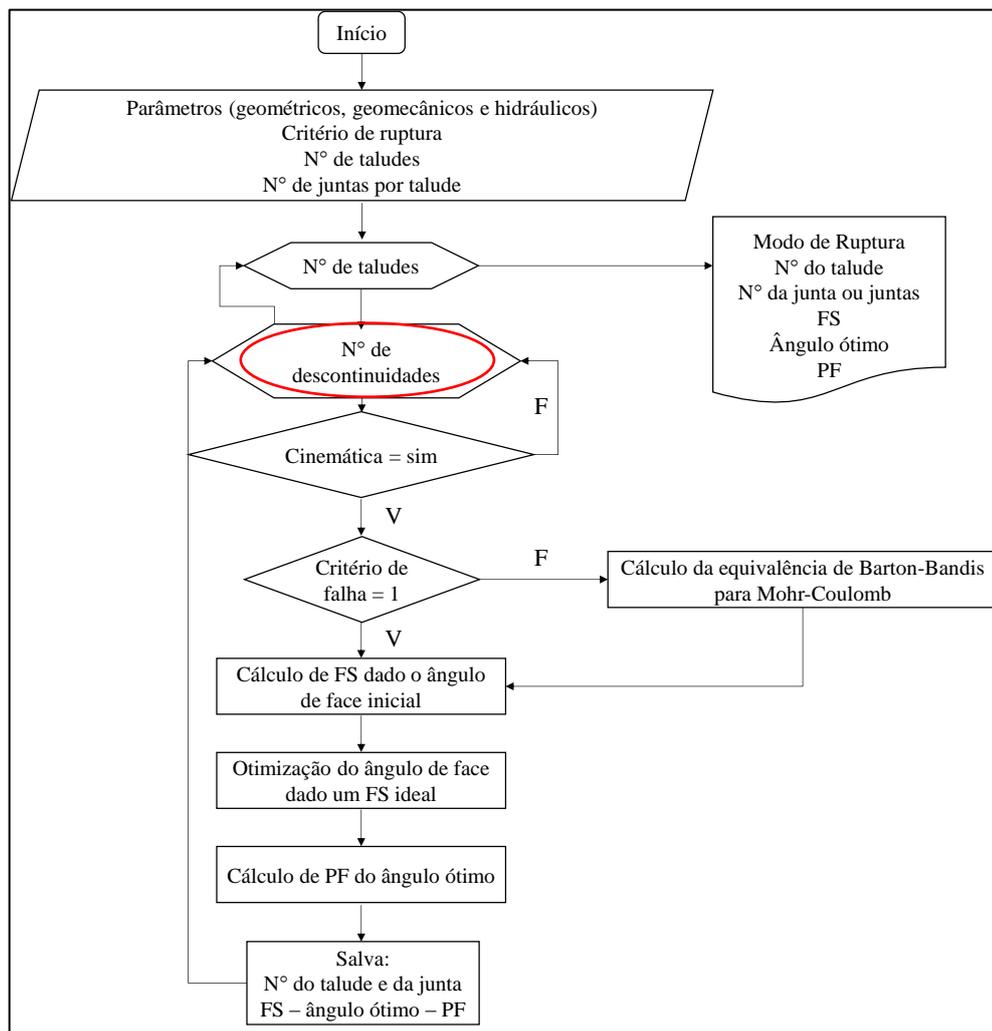


Figura 5.2 – Fluxograma geral aplicado para cada modo de ruptura

Alguns programas existentes no mercado de análise de estabilidade serviram para a validação e calibração dos resultados obtidos pelo ProBench.

5.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROBENCH

Durante a criação do ProBench, alguns programas existentes no mercado foram utilizados para sua calibração e validação. Os resultados obtidos com as análises planares e cunha puderam ser comparados. O tombamento por ser do tipo flexural, não teve nenhum programa comercial para comparação de seus resultados.

Inicialmente, procedeu-se à verificação dos resultados do ProBench no *RocPlane* (Rocscience, 2016b) para análises de rupturas planares. Dois prováveis casos são testados de acordo com a Tabela 5.1. O mesmo talude homogêneo, é testado primeiro sem fenda de tração e depois com fenda de tração de 15 m de profundidade. Os dois casos são avaliados com a descontinuidade sem água e, depois, saturada.

Tabela 5.1 – Parâmetros dos Talude A e da descontinuidade 1 para validação dos resultados do ProBench para ruptura planar

		Talude A	Parâmetros		Descontinuidade 1
Mergulho [°]		60,0	Geométricos	Mergulho [°]	20,0
Direção de mergulho [°]		125,0		Direção de mergulho [°]	125,0
Altura [m]		50,0	Mohr_Coulomb	ϕ [°]	25,0
γ [kPa]		22,5		c [kPa]	50,0
			Barton_Bandis	JRC	3,0
				JCS [MPa]	50,0
				ϕ _básico[°]	33,0

O talude A foi identificado no arquivo de entrada do ProBench (Apêndice III) como sendo ‘Bench’ 1,2,3,4, na área referente a “SLOPE_INFO”.

Para rupturas em cunha, a verificação dos resultados do ProBench foi feita utilizando-se o Programa *Swedge* (Rocscience, 2014a). Para essas validações foram avaliados dois taludes homogêneos diferentes, cada um tem a presença de duas descontinuidades distintas. Um deles possui fenda de tração e os dois são avaliados com as descontinuidades sem água e, posteriormente, saturadas. Para o talude com fenda de tração, ela está localizada a 10 m de distância da crista do talude.

Os taludes B e C foram identificados, respectivamente, como ‘Bench’ 5 e 6 e ‘Bench’ 7 e 8. O arquivo de entrada do ProBench, devidamente preenchido pode ser consultado pelo Apêndice III. Para a otimização no ProBench, o valor de projeto do FS utilizado foi de 1,1. Esse fator de segurança se refere a bancos com baixa ou alta consequência de ruptura, o que pode ser observado na Tabela 2.3. Para uma validação dos dois critérios de ruptura possíveis, o ProBench foi executado primeiro por Mohr-Coulomb e depois por Barton-Bandis.

Tabela 5.2 – Parâmetros dos taludes e da desc. (descontinuidade) para validação dos resultados do ProBench para ruptura em cunha

Talude B		Talude C	
Sem fenda de tração		Com fenda de tração	
Mergulho [°]	80,0	Mergulho [°]	65,0
Direção de mergulho [°]	185,0	Direção de mergulho [°]	180,0
Altura [m]	15,0	Altura [m]	30,0
γ [kPa]	26,0	γ [kPa]	26,0

Parâmetros - Talude B		Desc. 1	Parâmetros - Talude C		Desc. 1
Geométricos	Mergulho [°]	45,0	Geométricos	Mergulho [°]	45,0
	Direção de mergulho [°]	125,0		Direção de mergulho [°]	135,0
Mohr_Coulomb	ϕ [°]	30,0	Mohr_Coulomb	ϕ [°]	35,0
	c [kPa]	100,0		c [kPa]	50,0
Barton_Bandis	JRC	10,0	Barton_Bandis	JRC	10,0
	JCS [MPa]	30,0		JCS [MPa]	30,0
	ϕ _básico[°]	30,0		ϕ _básico[°]	30,0
Parâmetros - Talude B		Desc. 2	Parâmetros - Talude C		Desc. 2
Geométricos	Mergulho [°]	75,0	Geométricos	Mergulho [°]	45,0
	Direção de mergulho [°]	225,0		Direção de mergulho [°]	225,0
Mohr_Coulomb	ϕ [°]	25,0	Mohr_Coulomb	ϕ [°]	35,0
	c [kPa]	10,0		c [kPa]	10,0
Barton_Bandis	JRC	10,0	Barton_Bandis	JRC	10,0
	JCS [MPa]	30,0		JCS [MPa]	30,0
	ϕ _básico[°]	30,0		ϕ _básico[°]	30,0

O *RocPlane* e o *Swedge* não otimizam o ângulo de face automaticamente, sendo necessário achar o ângulo ótimo de forma iterativa, pela análise de sensibilidade. Sendo assim, após a geração dos resultados do ProBench, o seu ângulo ótimo foi introduzido no *RocPlane* e no *Swedge* para conferir se o valor do fator de segurança daria o requerido, que no caso seria igual a 1,1.

A análise probabilística foi utilizada 10.000 simulações por Monte Carlo, considerando as variáveis aleatórias com distribuições normais e com coeficientes de variação seguindo a Tabela 2.1.

5.3. PARÂMETROS DE ENTRADA DA MINA ESTUDADA

Para otimizar as inclinações das inter-rampas e dos bancos da mina estuda é necessário saber em quais litologias essas estruturas serão feitas, como também, seus parâmetros geométricos e geomecânicos. A partir da otimização da inclinação global, realizada em uma seção 2D no Capítulo 4 desta dissertação, foram julgadas em quais litologias e contextos geomecânicos as inter-rampas e os bancos estariam inseridos. A angulação ótima global encontrada para o caso de um custo moderado de ruptura foi de 32,5°, onde basicamente expõe a litologia denominada ‘xic’.

Essa litologia possui foliações (Tabela 4.1), como também, descontinuidades, sendo essas duas feições geológicas possíveis planos de fraqueza. Sendo assim, foram utilizados os parâmetros de resistência do critério de Barton-Bandis (Tabela 5.3), concedido pela empresa possuidora da mina de estudo.

Tabela 5.3 – Parâmetros dos planos de fraqueza presentes nas estruturas analisadas

Parâmetros		Foliação	Desc. 2	Desc. 3	Desc. 4	Desc. 5
Geométricos	Mergulho [°]	40,0	87,0	86,0	83,0	88,0
	Direção de mergulho [°]	151,0	181,0	45,0	311,0	260,0
Barton_Bandis	JRC	1,7	5,6	13,7	13,8	12,2
	JCS [MPa]	43,7	49,1	63,7	60,6	42,4
	Ø_básico[°]	34,0	34,0	34,0	34,0	34,0

Foram realizadas 4 configurações de taludes: 2 com geometria de banco e 2 com geometria de inter-rampa. Os parâmetros geométricos das inter-rampas foram:

- Altura = 60 m
- Comprimento (berma) = 30 m

Com parâmetros geométricos para os bancos, dados por:

- Altura = 15 m
- Comprimento (berma) = 8 m

A direção de mergulho da seção 2D é de 80° e o mergulho utilizado de 60° é dado como valor inicial para a busca do ângulo ótimo. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros, de forma resumida, das estruturas avaliadas.

Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para otimização das inter-rampas e bancos da seção

	Inter-rampa	Banco
Mergulho [°]	60,00	60,00
Direção de mergulho [°]	80,00	80,00
Altura [m]	60,00	15,00
Comprimento (berma) [m]	30,00	8,00
γ [kPa]	24,67	24,67

A foliação foi considerada como sendo a descontinuidade 1. Cada geometria é realizada um teste sem água e outro com água. O fator de segurança considerado de projeto para essas estruturas foi de 1,1. O arquivo de entrada preenchido com todos esses parâmetros pode ser acessado no Apêndice IV.

5.4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração e validação do ProBench pelo Rocplane e pelo Swedge, para os métodos de ruptura planar e em cunha, geraram respectivamente, os resultados expressos na Tabela 5.5 e Tabela 5.6.

De acordo com as tabelas (Tabela 5.5 e Tabela 5.6) os casos deram na maioria exatamente os mesmos resultados dos programas comercialmente utilizados, validando assim a

eficácia do ProBench. O arquivo entrada e de saída do ProBench estão dados no Apêndice III. Os resultados gráficos do *RocPlane* e do *Swedge* podem ser acessados no Anexo I.

Tabela 5.5 – Validação do ProBench pelo *Rocplane*, usando os critérios de Mohr-Coulomb e Barton-Bandis.

Talude A		ProBench					
		Mohr-Coulomb			Barton-Bandis		
		FS	Ângulo ótimo	PF	FS	Ângulo ótimo	PF [%]
S/ fenda	Sem água	1,63	90,00	0,00	2,25	90,0	0,00
	Com água	1,23	25,00	41,67	1,58	33,0	17,64
C/ fenda	Sem água	1,56	90,00	0,00	2,23	90,0	0,00
	Com água	1,29	84,00	19,84	1,79	33,0	12,37

Talude A		RocPlane					
		Mohr-Coulomb			Barton-Bandis		
		FS	Ângulo ótimo	PF	FS	Ângulo ótimo	PF [%]
S/ fenda	Sem água	1,63	90,00	0,00	2,25	90,0	0,00
	Com água	1,23	25,00	42,67	1,58	33,0	17,64
C/ fenda	Sem água	1,56	90,00	0,00	2,23	90,0	0,00
	Com água	1,29	84,00	19,84	1,79	33,0	12,37

Para que não ocorra um erro de interpretação é importante explicitar que a diferença no FS para um mesmo talude, dentro do mesmo programa, considerando o critério de Mohr-Coulomb e de Barton-Bandis está coerente. Pois o ProBench ao utilizar Barton-Bandis, ignora os dados de entrada referente a Mohr-Coulomb, e vice e versa. Os valores de entrada dos parâmetros de resistência das descontinuidades, nesses casos, não tiveram nenhuma relação de um critério para o outro. A interpretação é que as descontinuidades nesses casos, ao mudarem de critério, têm seus parâmetros de resistência modificados sem relação.

O tombamento flexural também foi avaliado para esses taludes e respectivas descontinuidades. No entanto, nenhum dos casos resultou em uma cinemática para que o tombamento ocorresse, por isso não obtiveram resultados numéricos para as análises de estabilidade.

Tabela 5.6 – Validação do ProBench pelo *Swedge*, usando os critérios de Mohr-Coulomb e Barton-Bandis.

		ProBench					
		Mohr-Coulomb			Barton-Bandis		
Talude B		FS	Ângulo ótimo	PF	FS	Ângulo ótimo	PF
S/ fenda	Sem água	2,37	90,00	0,35	2,13	53,0	0,00
	Com água	1,86	84,00	6,12	1,11	77,0	37,45
Talude C							
C/ fenda	Sem água	1,51	90,00	0,35	2,21	90,0	0,00
	Com água	1,01	61,00	27,16	1,43	81,0	26,21

		Swedge					
		Mohr-Coulomb			Barton-Bandis		
Talude B		FS	Ângulo ótimo	PF	FS	Ângulo ótimo	PF
S/ fenda	Sem água	2,37	90,00	0,35	2,13	53,0	0,00
	Com água	1,86	84,00	6,12	1,10	77,0	37,45
Talude C							
C/ fenda	Sem água	1,51	90,00	0,35	2,21	90,0	0,00
	Com água	1,01	61,00	27,16	1,39	81,0	26,21

Finalmente, finalizadas as validações, o Programa ProBench foi utilizado para a otimização das inter-rampas e bancos da seção 2D mina de estudo. A partir dos parâmetros da litologia presente, ‘xic’, e da geometria das estruturas otimizáveis, os resultados apontaram cinemática para ruptura em cunha e tombamento. A ruptura planar não desenvolveu cinemática nessas estruturas, dando um ângulo ótimo de 90° tanto para banco quanto para inter-rampa. As otimizações nas análises de cunha e tombamento, resultaram em ângulos menores que 90°.

Os resultados do FS gerados pelas análises do tombamento flexural não tiveram como ser validados, devida a falta de um *software* que faça essas análises. Porém, para conferir se os resultados estão dentro de um limite coerente foi confirmado através do *software* comercial *Dips* (Rocscience, 2016a) o valor da inclinação do talude limite para que ocorra uma condição cinemática favorável ao deslizamento. Ou seja, o ângulo de face do talude que resulta em um fator de segurança igual a 1,0 foi descoberto utilizando o ProBench posteriormente testados no *Dips*. Essa validação confirmou a exatidão do ProBench

quando testado com o ângulo limite de face, os resultados desses testes podem ser acessados pelo anexo II.

Nas análises em cunha o ângulo ótimo para inter-rampa e banco foi de 52° e nas análises de tombamento o ângulo ótimo para inter-rampa foi de $39,00^\circ$ e para banco 47° . O ângulo ótimo aplicado a essas estruturas, deve ser o menor dentre os encontrados para que nenhum desses modos de ruptura ocorram. Sendo assim, os resultados do ângulo ótimo seguiram o modo de ruptura mais crítico, tombamento, dando 39° para inter-rampa e 47° para banco. O valor da inclinação da inter-rampa pode ser arredondado para 40° , visto que as probabilidades de falha para os ângulos ótimos nas análises de ruptura por tombamento deram bem abaixo dos valores limites (Tabela 2.3).

Os resultados da probabilidade de falha podem ser utilizados na análise de risco das inter-rampas e dos bancos. O resultado do risco que essas estruturas representam pode ser somado ao risco global e conseqüentemente influenciar a função de lucro. Porém, por hipótese, essas estruturas apresentaram custos de ruptura muito baixos, ou seja, custos de falha iniciais de quase zero, o que implica riscos também praticamente nulos.

Tem-se também o fato da consideração global, inter-rampa e banco por separado faz com que o risco de inter-rampa e banco sejam uniformes na análise de otimização do risco global, conseqüentemente não modificaria o resultado do ângulo ótimo.

CONCLUSÕES E PESQUISAS COMPLEMENTARES

6.1. CONCLUSÕES

Como síntese do trabalho apresentado, considera-se pertinente expressar algumas das principais conclusões finais. Na avaliação da segurança de taludes de mineração e de outras obras geotécnicas, a imposição de cálculos determinísticos dos seus indicadores de desempenho tem-se revelado insuficiente. Isso se deve particularmente ao fato de que fatores de segurança elevados não correspondem necessariamente a baixas probabilidades de falha e vice-versa. A grande variabilidade das propriedades dos maciços rochosos influencia a relação entre o fator de segurança e a probabilidade de falha.

As incertezas nos parâmetros de taludes rochosos devem ser avaliadas pela aplicação de abordagens probabilísticas, possibilitando a elaboração de um processo de gestão de riscos. Alguns parâmetros, tais como GSI e s , demonstraram grande variabilidade, fortalecendo a necessidade de estudos probabilísticos e não apenas determinísticos.

A otimização das inclinações do talude global, da inter-rampa e dos bancos da seção 2D da mina teve o intuito de anteceder a geometria para os planos de lavra operarem de modo mais seguro e com um aproveitamento econômico eficiente. A utilização do modelo de blocos geológico 3D da mina, para a execução de análises numéricas pelo FLAC^{3D}, demonstrou uma importante metodologia para criação da geometria de modelos numéricos. As informações inseridas no modelo de blocos propiciaram uma melhor adequação das análises, sendo necessários, entretanto, alguns outros parâmetros não existentes no modelo.

Por outro lado, o *software* FLAC^{3D} mostrou-se como uma ferramenta computacional extremamente valiosa e versátil para o estudo proposto, mas os tempos de processamento computacional para análises probabilísticas por acoplamento direto tenderam a ser muito

demorados, inviabilizando este trabalho. O emprego de modelos numéricos no FLAC^{3D}, conjuntamente ao método de superfície de resposta linear, foi uma opção eficiente e rápida computacionalmente para a aplicação das simulações de Monte Carlo.

Embora o método de superfície de resposta linear seja ‘simples’ e eficiente, ele geralmente não pode fornecer a precisão necessária para respostas altamente não-lineares devido ao uso de um único polinômio de ordem baixa, para representar todo o espaço de entrada. Sendo assim, para melhorar a precisão da equação, várias outras técnicas desenvolvidas na literatura podem ser aplicadas.

A criação do ProBench, *software* que analisa os modos de ruptura: planar, cunha e tombamento, tornou-se uma opção necessária para a otimização de estruturas de menor escala (inter-rampa e banco). Sua calibração foi realizada utilizando *softwares* existentes no mercado e que confirmaram sua exatidão nos resultados. Logo, sua utilização não fica limitada a esta dissertação, podendo ser utilizado também em âmbito comercial.

A linguagem de programação em Python foi muito utilizada, tanto para criação do ProBench, quanto no console *IPython* do FLAC^{3D}. Uma das razões que levou à sua utilização foi a sua universalidade pois trata-se de uma ferramenta de nível internacional e livre, fazendo todo o sentido usar esta linguagem para uma melhor difusão dos programas no futuro.

Os resultados das inclinações ótimas foram coerentes com as aplicações praticadas na mina estudada, afirmando a eficácia das metodologias utilizadas nessa pesquisa. A gestão de riscos teve como cálculo das probabilidades de falha apenas uma de suas etapas. Então, os resultados obtidos na análise probabilística não foram, por si só, conclusivos. As análises de custos de falha foram estendidas a dois cenários do projeto para, assim, propiciarem padrões de resultados que possibilitassem melhores tomadas de decisões.

Por fim, este trabalho contribui com um referencial teórico sobre variabilidade, abordagem probabilística, modos de falha em taludes rochosos de mineração e otimização de projetos, inseridos em um contexto de efetiva ponderações relativas aos riscos econômicos e dos lucros no âmbito desse tipo de obra.

6.2. PESQUISAS COMPLEMENTARES

Em termos de estudos futuros e complementares ao tema da presente pesquisa, são necessárias algumas recomendações. Inicialmente, a obtenção de parâmetros geomecânicos mais representativos e mais detalhados das litologias locais, com a determinação das faixas de variação dos parâmetros geotécnicos com melhor aproximação (menores coeficientes de variação). Essas informações diminuem a incerteza epistêmica, uma questão de grande importância, já que a probabilidade de falha é consideravelmente sensível à variação dos parâmetros geotécnicos.

Outra hipótese consiste na utilização de outras técnicas para geração da superfície de resposta (meta-modelo). Além do meta-modelo convencional baseado em polinômios, o uso das redes neurais artificiais constituem, por exemplo, uma opção bastante interessante.

O ProBench apresenta arquivos de entrada e saída de dados em formato *.txt e não possui uma interface gráfica, o que o torna pouco amigável ou atraente comercialmente em escala imediata. Assim, melhorias quanto a esses aspectos tornam-se necessárias para difusão e viabilização comercial do ProBench no futuro.

Este trabalho não incorporou a aplicação das metodologias probabilísticas e de otimização em um modelo 3D, ficando esta, então, como mais uma recomendação de pesquisa para trabalhos futuros neste âmbito de abordagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADABADI, M.; POISEL, R. (2015). Assessment of the application of point estimate methods in the probabilistic stability analysis of slopes. *Computers and Geotechnics*, 69, p. 540–550.

ASSIS, A. P. (2003). *Mecânica e engenharia de rochas*. Brasília: Publicação: G.AP-AA002/03. Apostila do curso avançado, UNB.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10(1), p. 1–54.

BECK, A. T. (2011). *Curso de confiabilidade estrutural*. São Carlos-SP: [s.n.].

CALDEIRA, T. S. M. G. (2016). *Aplicação de Retroanálise na Escavação de um Túnel na Ilha da Madeira*. Funchal – Portugal: Universidade da Madeira.

CHAPRA, S. C. R. P. C. (2016). *Métodos Numéricos para Engenharia*. 7^o ed. São Paulo: AMGH Editora LTDA.

COSTA, E. A. DA (2005). *Avaliação de ameaças e risco geotécnico aplicados à estabilidade de taludes*. Dissertação de mestrado, UFRGS. p. 159.

DAS, B. M. (2007). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning.

FIORI, A. P. (2016). *Estabilidade de taludes: Exercícios Práticos*. São Paulo: Oficina de Textos.

GOODMAN, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. 2^o ed. New York: Wiley.

HARR, M. E. (1987). *Reliability – Based Design in Civil Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Publishing Company.

HOEK, E. (1983). Strength of jointed rock masses. *Geotechnique*, 23(3), p. 187–223.

HOEK, E.; BRAY, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. 3rd. ed. London: Institution of Mining and Metallurgy.

HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: Proceedings of NARMS-Tac. Anais... p. 267–273.

HUALLANCA, R. E. Z. (2004). Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto. São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos.

HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. (2013). Open Pit Mine Planning and Design. 3º ed. New York: CRC Press.

INTERNATIONAL SOCIETY OF SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING (2004). TC304 - Glossary of Risk Assessment Terms - Version 1, July 2004.

ITASCA CONSULTING GROUP INC (2012). FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions). v. 5.01. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc.

KING, P. (2011). Ore-Body Sampling and Metallurgical Testing. In: DARLING, P. (Ed.). . SME Mining Engineering Handbook. 3º ed. USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. p. 46.

MAPTEK (2017). Vulcan — Geological Modelling and Mine Planning. Adelaide: MAPTEK

MELCHERS, R. E. (2002). Structural Reliability: Analysis and Prediction. 2nd. ed. Chichester, W. Sussex, England: John Wiley & Sons.

MICHALOWSKI, R. L.; DAWSON, E. M. (2002). Three-dimensional analysis of limit loads on mohr-coulomb soil. Foundations of civil and environmental engineering, 1, p. 137–147.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. (2003). Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4º ed. Rio de Janeiro: tradução Verônica Calado; LTC.

NAPA-GARCÍA, G. F. (2015). Análise de risco de obras subterrâneas em maciços rochosos fraturados. 184 p. Tese (doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos.

Numpy.linalg.lstsq (2017). Disponível em: <<https://docs.scipy.org/doc/numpy-1.13.0/reference/generated/numpy.linalg.lstsq.html>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

PEIXOTO, L. (2015). Modelação numérica de túneis com consideração explícita das heterogeneidades do maciço. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho. p. 139.

PINTO, C. DE S. (2006). Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos.

PRASSETYO, S. H.; GUTIERREZ, M.; BARTON, N. (2017). Nonlinear shear behavior of rock joints using a linearized implementation of the Barton–Bandis model. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(4), p. 671–682.

READ, J.; STACEY, P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*. Collingwood: CSIRO Publishing/CRC Press.

ROCSCIENCE (2014a). *Swedge: analysis of the geometry and stability of surface wedges*. v. 6.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc.

ROCSCIENCE (2014b). *RocTopple: Toppling stability analysis*. v. 1.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc.

ROCSCIENCE (2016a). *Dips: software user's guide*. v. 7.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc

ROCSCIENCE (2016b). *RocPlane: planar sliding analysis for rock slopes*. v. 3.0. Toronto, Ontário, Canada: Rocscience Inc

ROCSCIENCE (2016c). *RocData: Rock, Soil and Discontinuity Strength Analysis*. v. 5.0. Toronto, Ontário, Canada: RocScience.

scipy.optimize.curve_fit (2017). Disponível em: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html>. Acesso em: 10 jan. 2018.

SUDRET, B. (2012). Meta-models for Structural Reliability and Uncertainty Quantification. In: *Proceedings of the 5th Asian-Pacific Symposium on Structural*

Reliability and its Applications. Anais...Singapore: Research Publishing Services, Disponível em: <<http://rpsonline.com.sg/proceedings/9789810722197/html/P321.xml>> p. 53–76.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. (2004). Rock Slope Engineering: Civil and Mining. 4^o ed. London, UK: Based on Rock Slope Engineering (3rd edition, 1981) by Dr. Evert Hoek and Dr. John Bray. Spon Press / Taylor & Francis Group.

YANG, R. et al. (2017). Probabilistic Stability Analysis of Slopes by Conditional Random Fields. In: Geo-Risk 2017. Anais...Reston, VA: American Society of Civil Engineers, Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784480717.043>> p. 450–459.

APÊNDICE I: TUTORIAL DE UTILIZAÇÃO DO PROBENCH

O ProBench, naturalmente, possui particularidades que devem ser explicadas ao utilizador para este se familiarizar rapidamente com o preenchimento correto do arquivo de entrada. Antes de iniciar o programa, esses aspectos logísticos essenciais devem estar preenchidos.

A introdução dos dados iniciais será feita num ficheiro chamada “INPUT.txt” devidamente formatado. Importante que o nome desse arquivo não seja alterado e que permaneça dentro da mesma pasta que toda a programação em Python.

O arquivo de entrada encontra-se dividido em várias secções entre as quais estão nomeadas. De acordo com a numeração adicionada na Figura I.1, tem-se:

1 – Escolha do critério de falha (FAILURE_CRIT_JOINTS):

- “1” para Mohr-Coulomb e “2” para Barton-Bandis.

2 – Densidade da água (UNIT_WEIGHT_WATER).

3 – Juntas existentes em toda região a ser avaliada (JOINT_INFO):

- Numeração para identificação de cada junta;
- Mergulho (DIP) e direção de mergulho (DIP_DIRECTION) da junta;
- Parâmetros de Mohr-Coulomb (ângulo de atrito (PHI) e coesão (COHESION));
- Parâmetros de Barton-Bandis (JRC, JCS e ângulo de atrito básico (PHI_BASICO));
- Altura (h) que a junta aflora, caso seja acima do pé do talude.

4 – Litologias presentes (LITHOLOGY_INFO):

- Numeração para identificação de cada litologia;

- Densidade da litologia (UNIT_WEIGHT).

5 – Domínios estruturais que região foi dividida (STRUCTURAL_DOMAIN_INFO):

- Numeração para identificação de cada domínio estrutural;
- Juntas que existem no referente domínio (EXISTING_JOINT);
- Altura da água em relação à altura dos taludes (WATER_HEIGHT).

6 – Taludes que serão analisados (SLOPE_INFO):

- Numeração para identificação de cada inter-rampa e/ou banco;
- Número do domínio estrutural que esse talude pertence (STRUCTURAL_DOMAIN);
- Mergulho (DIP) e direção de mergulho (DIP_DIRECTION) do talude;
- Altura do talude (HEIGHT);
- Comprimento da berma (WIDTH);
- Mergulho (DIP_TOPO) e direção de mergulho (DIP_DIR_TOPO) do plano topo do talude. Essa opção só é considerada em rupturas planares, as outras rupturas ignoram essa informação;
- Número referente a litologia do talude (EXISTING_LITOLOGIES). Cada talude deve ser constituído por apenas uma litologia;
- Presença ou não de fenda de tração (CRACK). Sendo, yes = sim e no = não;
- Altura da água na fenda de tração (HW_CRACK);
- Distância da fenda de tração à crista do talude (DIST_CRACK).

Todas as lacunas devem estar preenchidas, mesmo que não sejam utilizadas. Como por exemplo: Caso escolha o critério de Barton-Bandis a Coesão e o ângulo de atrito de Mohr-Coulomb deve ter um número em sua lacuna, pode ser qualquer valor, pois ele será lido mas não será utilizado nos cálculos.

```

INPUT_texto - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
*****
*TITLE: ANALISE_DE_ESCORREGAMENTO_EM_UMA_CAVA
*****
INPUT DATA
*****
*FAILURE_CRIT_JOINTS ← 1
1
1 MOHR-COULOMB
2 BARTON-BANDIS

*UNIT_WEIGHT_WATER(kN/m3) ← 2
9.81

*JOINT_INFO ← 3
-----
JOINT  DIP(°)  DIP_DIRECTION(°)  PHI(°)  COHESION(kPa)  JRC(adm.)  JCS(MPa)  PHI_BASIC(°)  h(m)
-----
1      25.0    105.0             15.0    100.0           3.0        50.0      33.0          0.0
2      40.0    120.0             25.0    100.0           10.0       30.0      30.0          0.0
3      45.0    25.0              35.0    30.0            10.0       30.0      30.0          0.0
-----

*LITHOLOGY_INFO ← 4
-----
LITHOLOGY  UNIT_WEIGHT(kN/m3)
-----
1          25.5
2          22.0
-----

*STRUCTURAL_DOMAIN_INFO ← 5
-----
STRUCTURAL_DOMAIN  EXISTING_JOINT  WATER_HEIGHT(%)
-----
1                  (1,2)                0.0
2                  (3)                 100.0
-----

*SLOPE_INFO ← 6
-----
BENCH  STRUCTURAL_DOMAIN  DIP(°)  DIP_DIRECTION(°)  HEIGHT(m)  WIDTH(m)  DIP_TOPO(°)  DIP_DIR_TOPO(°)  EXISTING_LITOLOGIES  CRACK  HW_CRACK(%)  DIST_CRACK(m)
-----
1      1                60.0    125.0            15.0       30.0       0.0          0.0              1                    no     0.0          0.0
2      2                60.0    35.0             15.0       30.0       0.0          0.0              2                    yes    0.0          0.0
-----

*****
*EOF
*caso o DIP_DIRECTION seja 0° preencher com o valor de 360°.
*****

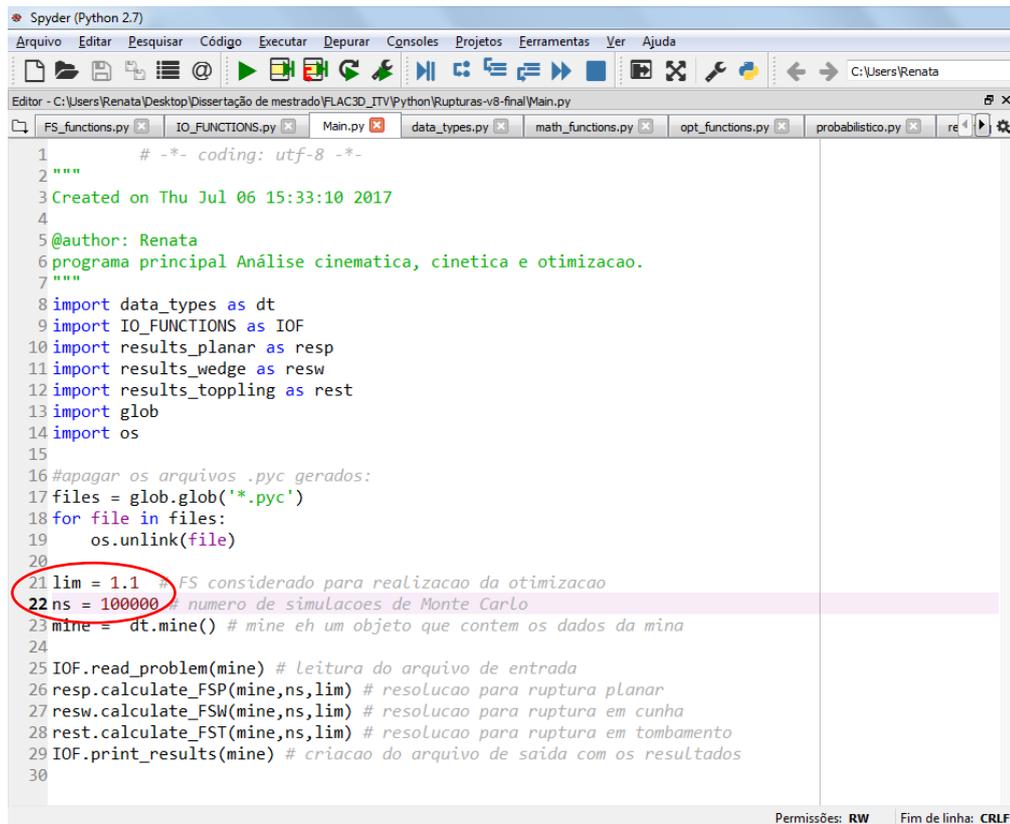
```

Figura I.1 – Arquivo de entrada (“INPUT.txt”) com um exemplo de preenchimento.

Os números de identificação de cada secção devem começar de 1 e estarem em ordem crescente e caso o caso o DIP_DIRECTION de alguma estrutura seja 0° deve-se preencher o valor de 360°. A sigla EOF (end-of-file) ao final do arquivo de entrada, é apenas uma referência de que não há mais dados a serem lidos.

Após o preenchimento do arquivo de entrada o arquivo principal “Main.py” (Figura I.2), deverá ser executado via Spyder (Python 2.7). A partir da execução desse arquivo, o programa irá calcular o que foi programado e salvar um arquivo de saída com os resultados requeridos.

A região circulada em vermelho na Figura I.2, pode ser alterada pelo usuário. A variável chamada de “lim” é o valor do fator de segurança que será utilizado para a otimização do talude, ou seja, o programa irá procurar qual o ângulo de face que resulta nesse fator de segurança. Já a variável “ns” é o número de simulações de Monte Carlo que serão feitas.



```
1 # -*- coding: utf-8 -*-
2 """
3 Created on Thu Jul 06 15:33:10 2017
4
5 @author: Renata
6 programa principal Análise cinematica, cinetica e otimizacao.
7 """
8 import data_types as dt
9 import IO_FUNCTIONS as IOF
10 import results_planar as resp
11 import results_wedge as resw
12 import results_toppling as rest
13 import glob
14 import os
15
16 #apagar os arquivos .pyc gerados:
17 files = glob.glob('*.*.pyc')
18 for file in files:
19     os.unlink(file)
20
21 lim = 1.1 # FS considerado para realizacao da otimizacao
22 ns = 100000 # numero de simulacoes de Monte Carlo
23 mine = dt.mine() # mine eh um objeto que contem os dados da mina
24
25 IOF.read_problem(mine) # leitura do arquivo de entrada
26 resp.calculate_FSP(mine,ns,lim) # resolucao para ruptura planar
27 resw.calculate_FSW(mine,ns,lim) # resolucao para ruptura em cunha
28 rest.calculate_FST(mine,ns,lim) # resolucao para ruptura em tombamento
29 IOF.print_results(mine) # criacao do arquivo de saida com os resultados
30
```

Figura I.2 – Arquivo executável “Main.py”

Após a execução desse arquivo, serão gerados e salvos os resultados. Os resultados poderão ser acessados pelo arquivo “Results.txt”, o mesmo estará organizado por secções.

De acordo com a numeração adicionada à Figura I.3, tem-se:

1 – Resultados de todos os taludes quanto a ruptura planar (Planar Failure):

- Número da identificação do talude (Slope)
- Número de identificação da junta que foi avaliada (Joint)
- Resultado do Fator de segurança (FS) para o mergulho da face do talude que foi preenchido no arquivo de entrada
- Resultado do ângulo ótimo para esse talude (Optimized_Dip)
- Resultado da probabilidade de falha (PF) para o ângulo ótimo

2 – Resultados de todos os taludes quanto a ruptura em cunha (Wedge Failure):

- Todos os tópicos que contém nesse secção tem os mesmo significados que foram explicados anteriormente para ruptura planar.

3 – Resultados de todos os taludes quanto a ruptura em tombamento (Toppling Failure):

- Todos os tópicos que contém nesse secção tem os mesmo significados que foram explicados anteriormente para ruptura planar.

Quando a junta ou a combinação de duas juntas (análise em cunha), não formam uma condição cinemática para a ruptura que estiver em questão, um resultado é impresso para expressar essa situação. O “Unl.” é impresso no lugar de um resultado numérico e significa falha improvável (Unlikely failure).

Results - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

```

*****
**Planar Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1             2.44  90.00  2.78
1      2             2.62  90.00  5.63
2      3             1.13  90.00  34.6
*****
**Wedge Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1,2          5.94  90.00  0.69
2      3            Unl.  90.00  Unl.
*****
**Toppling Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1            Unl.  90.00  Unl.
1      2            Unl.  90.00  Unl.
2      3            Unl.  90.00  Unl.
Unl. = Unlikely failure

```

Figura I.3 – Arquivo de saída dos resultados: “Results.txt”

**APÊNDICE II: PARÂMETROS GERADOS NO FLAC^{3D} E
UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DO META-MODELO**

Tabela II. 1 – Tabela de dados gerada pelas simulações realizadas no FLAC^{3D}.

Simulação	Variáveis aleatórias											Resultados		
	Coef.	Ang	NA	phi_xic	coh_xic	phij_xic	cohj_xic	...	phij_ic	cohj_ic	phi_if	coh_if	FS	Benefício
1	1	31	8,74E+02	3,60E+01	5,85E+06	3,09E+01	1,67E+06	...	1,73E+01	2,28E+06	2,51E+01	1,44E+05	3,41	3,01E+04
2	1	31,39	8,42E+02	3,51E+01	4,40E+06	2,14E+01	2,04E+06	...	4,17E+01	1,20E+06	2,76E+01	6,61E+04	2,81	3,21E+04
3	1	31,78	7,86E+02	3,96E+01	3,62E+06	2,71E+01	1,19E+06	...	2,29E+01	1,83E+06	2,20E+01	1,19E+05	3,81	3,42E+04
4	1	32,17	8,23E+02	3,67E+01	3,68E+06	2,87E+01	9,50E+05	...	2,02E+01	2,91E+06	3,69E+01	1,35E+05	3,47	3,86E+04
5	1	32,95	9,63E+02	4,80E+01	4,17E+06	2,62E+01	2,23E+06	...	4,13E+01	2,71E+06	2,00E+01	8,60E+04	1,81	4,31E+04
6	1	33,34	8,40E+02	4,23E+01	3,23E+06	2,86E+01	8,87E+05	...	1,92E+01	2,89E+06	4,83E+01	9,90E+04	3,09	4,53E+04
:	:	:	:	:	:	:	:	...	:	:	:	:	:	:
38	1	49,72	9,27E+02	4,10E+01	6,16E+06	1,87E+01	1,40E+06	...	3,62E+01	2,32E+06	4,21E+01	1,27E+05	2,31	5,42E+04
39	1	50,11	8,67E+02	4,96E+01	2,58E+06	1,81E+01	2,01E+06	...	3,13E+01	2,97E+06	5,41E+01	1,27E+05	2,81	5,35E+04
40	1	50,5	8,44E+02	2,80E+01	4,16E+06	1,96E+01	1,58E+06	...	2,24E+01	1,51E+06	4,88E+01	1,50E+05	2,72	5,02E+04
41	1	50,89	9,84E+02	3,55E+01	6,95E+06	2,51E+01	9,71E+05	...	3,87E+01	2,83E+06	3,01E+01	1,11E+05	1,59	4,96E+04
42	1	51,28	8,56E+02	3,53E+01	4,99E+06	4,03E+01	1,29E+06	...	1,56E+01	1,58E+06	2,10E+01	1,46E+05	1,97	4,62E+04
:	:	:	:	:	:	:	:	...	:	:	:	:	:	:
82	1	66,88	9,84E+02	3,46E+01	3,19E+06	2,42E+01	1,99E+06	...	1,81E+01	2,27E+06	5,04E+01	1,27E+05	0,22	7,97E+03
83	1	67,27	9,32E+02	2,04E+01	5,70E+06	3,40E+01	2,18E+06	...	3,06E+01	2,46E+06	5,25E+01	5,58E+04	1,31	7,93E+03
84	1	67,66	9,10E+02	4,38E+01	4,56E+06	3,25E+01	2,02E+06	...	2,28E+01	1,42E+06	5,57E+01	1,15E+05	2,19	7,70E+03
85	1	68,05	9,27E+02	3,45E+01	5,09E+06	2,29E+01	1,78E+06	...	3,97E+01	2,60E+06	2,74E+01	1,07E+05	1,13	7,17E+03
86	1	68,44	8,75E+02	4,28E+01	4,10E+06	2,62E+01	1,72E+06	...	1,76E+01	1,15E+06	2,55E+01	7,45E+04	1,09	7,14E+03
87	1	68,83	8,61E+02	3,76E+01	5,35E+06	2,05E+01	1,58E+06	...	1,66E+01	1,61E+06	5,21E+01	1,15E+05	1,25	6,62E+03
88	1	69,22	9,77E+02	2,43E+01	3,18E+06	3,93E+01	1,26E+06	...	2,22E+01	1,44E+06	5,38E+01	6,56E+04	0,19	6,60E+03
89	1	69,61	8,53E+02	2,68E+01	4,26E+06	2,17E+01	1,14E+06	...	1,46E+01	2,47E+06	5,30E+01	9,53E+04	1,50	6,59E+03

Tabela II. 2 – Tabela de coeficientes do modelo de regressão gerada pelas simulações realizadas no FLAC^{3D}.

β's (coeficientes do modelo de regressão)											
Coef.	Ang. [°]	NA [m]	Ø_xic [°]	c_xic [MPa]	Øfol_xic [°]	cfol_xic [MPa]	...	Øfol_ic [°]	cfol_ic [MPa]	Ø_if [°]	c_if [MPa]
5,654097	-0,05172	-0,00374	0,002397	0,12103	-0,009974	-0,183945	...	0,010214	-0,164887	0,017443	4,09946

Matriz [a]

Matriz [b]

Coef.	Ang.	NA	phi_xic	coh_xic	phij_xic	coh_j_xic	...	phij_ic	coh_j_ic	phi_if	coh_if	FS
1	31	8,74E+02	3,60E+01	5,85E+06	3,09E+01	1,67E+06	...	1,73E+01	2,28E+06	2,51E+01	1,44E+05	3,41
1	31,39	8,42E+02	3,51E+01	4,40E+06	2,14E+01	2,04E+06	...	4,17E+01	1,20E+06	2,76E+01	6,61E+04	2,81
1	31,78	7,86E+02	3,96E+01	3,62E+06	2,71E+01	1,19E+06	...	2,29E+01	1,83E+06	2,20E+01	1,19E+05	3,81
1	32,17	8,23E+02	3,67E+01	3,68E+06	2,87E+01	9,50E+05	...	2,02E+01	2,91E+06	3,69E+01	1,35E+05	3,47
1	32,95	9,63E+02	4,80E+01	4,17E+06	2,62E+01	2,23E+06	...	4,13E+01	2,71E+06	2,00E+01	8,60E+04	1,81
1	33,34	8,40E+02	4,23E+01	3,23E+06	2,86E+01	8,87E+05	...	1,92E+01	2,89E+06	4,83E+01	9,90E+04	3,09
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	49,72	9,27E+02	4,10E+01	6,16E+06	1,87E+01	1,40E+06	...	3,62E+01	2,32E+06	4,21E+01	1,27E+05	2,31
1	50,11	8,67E+02	4,96E+01	2,58E+06	1,81E+01	2,01E+06	...	3,13E+01	2,97E+06	5,41E+01	1,27E+05	2,81
1	50,5	8,44E+02	2,80E+01	4,16E+06	1,96E+01	1,58E+06	...	2,24E+01	1,51E+06	4,88E+01	1,50E+05	2,72
1	50,89	9,84E+02	3,55E+01	6,95E+06	2,51E+01	9,71E+05	...	3,87E+01	2,83E+06	3,01E+01	1,11E+05	1,59
1	51,28	8,56E+02	3,53E+01	4,99E+06	4,03E+01	1,29E+06	...	1,56E+01	1,58E+06	2,10E+01	1,46E+05	1,97
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1	66,88	9,84E+02	3,46E+01	3,19E+06	2,42E+01	1,99E+06	...	1,81E+01	2,27E+06	5,04E+01	1,27E+05	0,22
1	67,27	9,32E+02	2,04E+01	5,70E+06	3,40E+01	2,18E+06	...	3,06E+01	2,46E+06	5,25E+01	5,58E+04	1,31
1	67,66	9,10E+02	4,38E+01	4,56E+06	3,25E+01	2,02E+06	...	2,28E+01	1,42E+06	5,57E+01	1,15E+05	2,19
1	68,05	9,27E+02	3,45E+01	5,09E+06	2,29E+01	1,78E+06	...	3,97E+01	2,60E+06	2,74E+01	1,07E+05	1,13
1	68,44	8,75E+02	4,28E+01	4,10E+06	2,62E+01	1,72E+06	...	1,76E+01	1,15E+06	2,55E+01	7,45E+04	1,09
1	68,83	8,61E+02	3,76E+01	5,35E+06	2,05E+01	1,58E+06	...	1,66E+01	1,61E+06	5,21E+01	1,15E+05	1,25
1	69,22	9,77E+02	2,43E+01	3,18E+06	3,93E+01	1,26E+06	...	2,22E+01	1,44E+06	5,38E+01	6,56E+04	0,19
1	69,61	8,53E+02	2,68E+01	4,26E+06	2,17E+01	1,14E+06	...	1,46E+01	2,47E+06	5,30E+01	9,53E+04	1,50

APÊNDICE III: ARQUIVOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO PROBENCH PARA SUA VALIDAÇÃO

The screenshot shows a Notepad window with the following content:

```

Results_FS - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
*****
**Planar Failure
*****
Slope    Joint_Family    FS    Optimized_Dip    PF[%]
1        1                1.63    90.00            0.0
2        1                1.23    25.00            41.67
3        1                1.56    90.00            0.0
4        1                1.29    84.00            19.84
5        2                Unl.    90.00            Unl.
5        3                Unl.    90.00            Unl.
6        2                Unl.    90.00            Unl.
6        3                Unl.    90.00            Unl.
7        4                Unl.    90.00            Unl.
7        5                Unl.    90.00            Unl.
8        4                Unl.    90.00            Unl.
8        5                Unl.    90.00            Unl.
*****
**Wedge Failure
*****
Slope    Joint_Family    FS    Optimized_Dip    PF[%]
1        1                Unl.    90.00            Unl.
2        1                Unl.    90.00            Unl.
3        1                Unl.    90.00            Unl.
4        1                Unl.    90.00            Unl.
5        2,3            2.37    90.00            0.35
6        2,3            1.86    84.00            6.12
7        4,5            1.51    90.00            0.35
8        4,5            1.01    61.00            27.16
*****
**Toppling Failure
*****
Slope    Joint_Family    FS    Optimized_Dip    PF[%]
1        1                Unl.    90.00            Unl.
2        1                Unl.    90.00            Unl.
3        1                Unl.    90.00            Unl.
4        1                Unl.    90.00            Unl.
5        2                Unl.    90.00            Unl.
5        3                Unl.    90.00            Unl.
6        2                Unl.    90.00            Unl.
6        3                Unl.    90.00            Unl.
7        4                Unl.    90.00            Unl.
7        5                Unl.    90.00            Unl.
8        4                Unl.    90.00            Unl.
8        5                Unl.    90.00            Unl.

Unl. = Unlikely failure
  
```

Figura III.1 – Resultados ProBench. Critério de ruptura utilizado: Mohr-Coulomb.

```

INPUT - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
*****
*TITLE: ANALISE_DE_ESCORREGAMENTO_DE_BANCOS_EM_UMA_CAVA
*****
INPUT DATA
*****
*FAILURE_CRIT_JOINTS
1
1 MOHR-COULOMB
2 BARTON-BANDIS
*UNIT_WEIGHT_WATER(kN/m3)
9.81
*JOINT_INFO
-----
JOINT    DIP(°)    DIP_DIRECTION(°)    PHI(°)    COHESION(kPa)    JRC(adm.)    JCS(MPa)    PHI_BASIC(°)    h(m)
-----
1        20.0     125.0               25.0     50.0             3.0         50.0       33.0           0.0
2        45.0     125.0               30.0     100.0            10.0        30.0       30.0           0.0
3        75.0     225.0               25.0     10.0             10.0        30.0       30.0           0.0
4        45.0     135.0               35.0     50.0             10.0        30.0       30.0           0.0
5        45.0     225.0               35.0     10.0             10.0        30.0       30.0           0.0
-----
*LITHOLOGY_INFO
-----
LITHOLOGY    UNIT_WEIGHT(kN/m3)
-----
1                22.5
2                26.0
-----
*STRUCTURAL_DOMAIN_INFO
-----
STRUCTURAL_DOMAIN    EXISTING_JOINT    WATER_HEIGHT(%)
-----
1                    (1)              0.0
2                    (1)             100.0
3                   (2,3)             0.0
4                   (2,3)             0.0
5                   (4,5)             0.0
6                   (4,5)             0.0
-----
*SLOPE_INFO
-----
BENCH    STRUCTURAL_DOMAIN    DIP(°)    DIP_DIRECTION(°)    HEIGHT(m)    WIDTH(m)    DIP_TOPO(°)    DIP_DIR_TOPO(°)    EXISTING_LITOLOGIES    CRACK    HW_CRACK(%)    DIST_CRACK(m)
-----
1         1                    60.0     125.0              50.0         1000.0      0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
2         2                    60.0     125.0              50.0         1000.0      0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
3         1                    60.0     125.0              50.0         1000.0      0.0           0.0                1                    yes      0.0           67.3
4         2                    60.0     125.0              50.0         1000.0      0.0           0.0                1                    yes     100.0         67.3
5         3                    80.0     185.0              15.0         1000.0      0.0           0.0                2                    no       0.0           0.0
6         4                    80.0     185.0              15.0         1000.0      0.0           0.0                2                    no       0.0           0.0
7         5                    65.0     180.0              30.0         1000.0      0.0           0.0                2                    yes      0.0           10.0
8         6                    65.0     180.0              30.0         1000.0      0.0           0.0                2                    yes     100.0         10.0
-----

```

Figura III.2 – Arquivo de entrada do ProBench. Dados utilizados tanto para o critério de Mohr-Coulomb, quanto para Barton-Bandis.

```

Results_FS - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
*****
**Planar Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1             2.25  90.00          0.0
2      1             1.58  33.00          17.64
3      1             2.23  90.00          0.0
4      1             1.79  33.00          12.37
5      2             Unl.  90.00          Unl.
5      3             Unl.  90.00          Unl.
6      2             Unl.  90.00          Unl.
6      3             Unl.  90.00          Unl.
7      4             Unl.  90.00          Unl.
7      5             Unl.  90.00          Unl.
8      4             Unl.  90.00          Unl.
8      5             Unl.  90.00          Unl.
*****
**Wedge Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1             Unl.  90.00          Unl.
2      1             Unl.  90.00          Unl.
3      1             Unl.  90.00          Unl.
4      1             Unl.  90.00          Unl.
5      2,3          2.13  53.00          0.0
6      2,3          1.11  77.00          37.45
7      4,5          2.21  90.00          0.0
8      4,5          1.43  81.00          26.21
*****
**Toppling Failure
*****
Slope  Joint_Family  FS  Optimized_Dip  PF[%]
1      1             Unl.  90.00          Unl.
2      1             Unl.  90.00          Unl.
3      1             Unl.  90.00          Unl.
4      1             Unl.  90.00          Unl.
5      2             Unl.  90.00          Unl.
5      3             Unl.  90.00          Unl.
6      2             Unl.  90.00          Unl.
6      3             Unl.  90.00          Unl.
7      4             Unl.  90.00          Unl.
7      5             Unl.  90.00          Unl.
8      4             Unl.  90.00          Unl.
8      5             Unl.  90.00          Unl.
Unl. = Unlikely failure

```

Figura III.3 – Resultados ProBench. Critério de ruptura utilizado: Barton-Bandis.

APÊNDICE IV: ARQUIVOS DE ENTRADA E DE SAÍDA DO PROBENCH UTILIZADOS PARA A OTIMIZAÇÃO DA SEÇÃO DA MINA DE ESTUDO

```

*****
**Planar Failure
*****
Slope   Joint_Family   FS   Optimized_Dip   PF[%]
1       1               unl.  90.00           unl.
1       2               unl.  90.00           unl.
1       3               unl.  90.00           unl.
1       4               unl.  90.00           unl.
1       5               unl.  90.00           unl.
2       1               unl.  90.00           unl.
2       2               unl.  90.00           unl.
2       3               unl.  90.00           unl.
2       4               unl.  90.00           unl.
2       5               unl.  90.00           unl.
3       1               unl.  90.00           unl.
3       2               unl.  90.00           unl.
3       3               unl.  90.00           unl.
3       4               unl.  90.00           unl.
3       5               unl.  90.00           unl.
4       1               unl.  90.00           unl.
4       2               unl.  90.00           unl.
4       3               unl.  90.00           unl.
4       4               unl.  90.00           unl.
4       5               unl.  90.00           unl.
*****
**wedge Failure
*****
Slope   Joint_Family   FS   Optimized_Dip   PF[%]
1       1,2            unl.  90.00           unl.
1       1,3            1.05 90.00           42.32
1       1,4            unl.  90.00           unl.
1       1,5            unl.  90.00           unl.
1       2,3            unl.  90.00           unl.
1       2,4            unl.  90.00           unl.
1       2,5            unl.  90.00           unl.
1       3,4            unl.  90.00           unl.
1       3,5            unl.  90.00           unl.
1       4,5            unl.  90.00           unl.
2       1,2            unl.  90.00           unl.
2       1,3            0.0  52.05           0.0
2       1,4            unl.  90.00           unl.
2       1,5            unl.  90.00           unl.
2       2,3            unl.  90.00           unl.
2       2,4            unl.  90.00           unl.
2       2,5            unl.  90.00           unl.
2       3,4            unl.  90.00           unl.
2       3,5            unl.  90.00           unl.
2       4,5            unl.  90.00           unl.
3       1,2            unl.  90.00           unl.
3       1,3            3.2  90.00           0.0
3       1,4            unl.  90.00           unl.
3       1,5            unl.  90.00           unl.
3       2,3            unl.  90.00           unl.
3       2,4            unl.  90.00           unl.
3       2,5            unl.  90.00           unl.
3       3,4            unl.  90.00           unl.
3       3,5            unl.  90.00           unl.
3       4,5            unl.  90.00           unl.
4       1,2            unl.  90.00           unl.
4       1,3            0.0  52.05           0.0
4       1,4            unl.  90.00           unl.
4       1,5            unl.  90.00           unl.
4       2,3            unl.  90.00           unl.
4       2,4            unl.  90.00           unl.
4       2,5            unl.  90.00           unl.
4       3,4            unl.  90.00           unl.
4       3,5            unl.  90.00           unl.
4       4,5            unl.  90.00           unl.
*****

```

Figura IV.1 – Resultados ruptura planar e em cunha do ProBench. Critério de ruptura utilizado: Barton-Bandis.

Results_FS - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

****wedge Failure**

Slope	Joint_Family	FS	Optimized_Dip	PF[%]
1	1,2	unl.	90.00	unl.
1	1,3	1.05	90.00	42.32
1	1,4	unl.	90.00	unl.
1	1,5	unl.	90.00	unl.
1	2,3	unl.	90.00	unl.
1	2,4	unl.	90.00	unl.
1	2,5	unl.	90.00	unl.
1	3,4	unl.	90.00	unl.
1	3,5	unl.	90.00	unl.
1	4,5	unl.	90.00	unl.
2	1,2	unl.	90.00	unl.
2	1,3	0.0	52.05	0.0
2	1,4	unl.	90.00	unl.
2	1,5	unl.	90.00	unl.
2	2,3	unl.	90.00	unl.
2	2,4	unl.	90.00	unl.
2	2,5	unl.	90.00	unl.
2	3,4	unl.	90.00	unl.
2	3,5	unl.	90.00	unl.
2	4,5	unl.	90.00	unl.
3	1,2	unl.	90.00	unl.
3	1,3	3.2	90.00	0.0
3	1,4	unl.	90.00	unl.
3	1,5	unl.	90.00	unl.
3	2,3	unl.	90.00	unl.
3	2,4	unl.	90.00	unl.
3	2,5	unl.	90.00	unl.
3	3,4	unl.	90.00	unl.
3	3,5	unl.	90.00	unl.
3	4,5	unl.	90.00	unl.
4	1,2	unl.	90.00	unl.
4	1,3	0.0	52.05	0.0
4	1,4	unl.	90.00	unl.
4	1,5	unl.	90.00	unl.
4	2,3	unl.	90.00	unl.
4	2,4	unl.	90.00	unl.
4	2,5	unl.	90.00	unl.
4	3,4	unl.	90.00	unl.
4	3,5	unl.	90.00	unl.
4	4,5	unl.	90.00	unl.

****Toppling Failure**

Slope	Joint_Family	FS	Optimized_Dip	PF[%]
1	1	unl.	90.00	unl.
1	2	unl.	90.00	unl.
1	3	unl.	90.00	unl.
1	4	unl.	90.00	unl.
1	5	0.85	47.00	17.98
2	1	unl.	90.00	unl.
2	2	unl.	90.00	unl.
2	3	unl.	90.00	unl.
2	4	unl.	90.00	unl.
2	5	0.85	47.00	17.98
3	1	unl.	90.00	unl.
3	2	unl.	90.00	unl.
3	3	unl.	90.00	unl.
3	4	unl.	90.00	unl.
3	5	0.71	39.00	14.26
4	1	unl.	90.00	unl.
4	2	unl.	90.00	unl.
4	3	unl.	90.00	unl.
4	4	unl.	90.00	unl.
4	5	0.71	39.00	14.26

unl. = unlikely failure

Figura IV.2 – Continuação dos Resultados ruptura cunha e tombamento do ProBench.

Critério de ruptura utilizado: Barton-Bandis

```

INPUT_mina - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
*****
*TITLE: ANALISE_DE_ESCORREGAMENTO_EM_UMA_CAVA
*****
INPUT DATA
*****
*FAILURE_CRIT_JOINTS
2
1 MOHR-COULOMB
2 BARTON-BANDIS
*UNIT_WEIGHT_WATER(kN/m3)
9.81
*JOINT_INFO
-----
JOINT    DIP(°)    DIP_DIRECTION(°)    PHI(°)    COHESION(kPa)    JRC(adm.)    JCS(MPa)    PHI_BASIC(°)    h(m)
-----
1        40.0     151.0              32.4     1600.0           1.7          43.71       34.0            0.0
2        87.0     181.0              32.4     1600.0           5.6          49.1        34.0            0.0
3        86.0     45.0               32.4     1600.0           13.7         63.7        34.0            0.0
4        83.0     311.0              32.4     1600.0           13.8         60.6        34.0            0.0
5        88.0     260.0              32.4     1600.0           12.2         42.4        34.0            0.0
-----
*LITHOLOGY_INFO
-----
LITHOLOGY    UNIT_WEIGHT(kN/m3)
-----
1              24.67
-----
*STRUCTURAL_DOMAIN_INFO
-----
STRUCTURAL_DOMAIN    EXISTING_JOINT    WATER_HEIGHT(%)
-----
1                    (1,2,3,4,5)      0.0
2                    (1,2,3,4,5)      100.0
-----
*SLOPE_INFO
-----
BENCH    STRUCTURAL_DOMAIN    DIP(°)    DIP_DIRECTION(°)    HEIGHT(m)    WIDTH(m)    DIP_TOPO(°)    DIP_DIR_TOPO(°)    EXISTING_LITOLOGIES    CRACK    HW_CRACK(%)    DIST_CRACK(m)
-----
1        1                    60.0     80.0               15.0         8.0         0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
2        2                    60.0     80.0               15.0         8.0         0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
3        1                    60.0     80.0               60.0        30.0        0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
4        2                    60.0     80.0               60.0        30.0        0.0           0.0                1                    no       0.0           0.0
-----
*****
*EOF
*caso o DIP_DIRECTION seja 0° preencher com o valor de 360°.
*****

```

Figura IV.3 – Arquivo de entrada do ProBench. Dados da mina de estudo.

ANEXO I: RESULTADOS GRÁFICOS DO ROCPLANE E DO SWEDGE PARA CALIBRAÇÃO DO PROBENCH

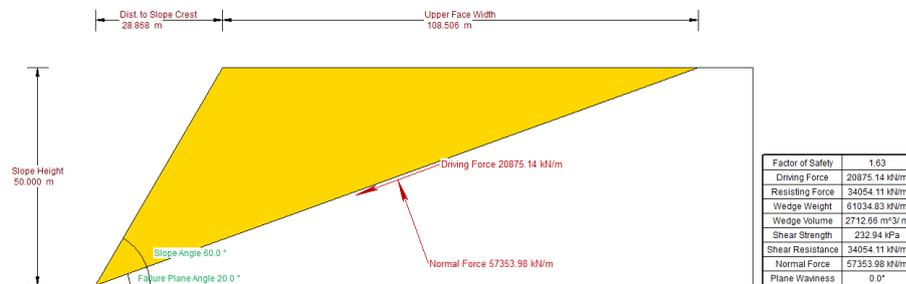


Figura A.1 – Talude A: sem fenda e sem água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Mohr-Coulomb

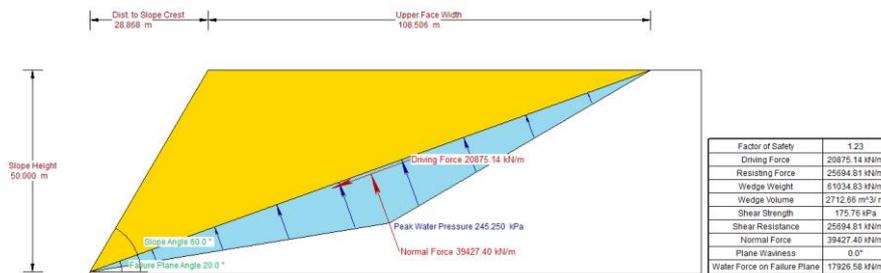


Figura A.2 – Talude A: sem fenda e com água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Mohr-Coulomb

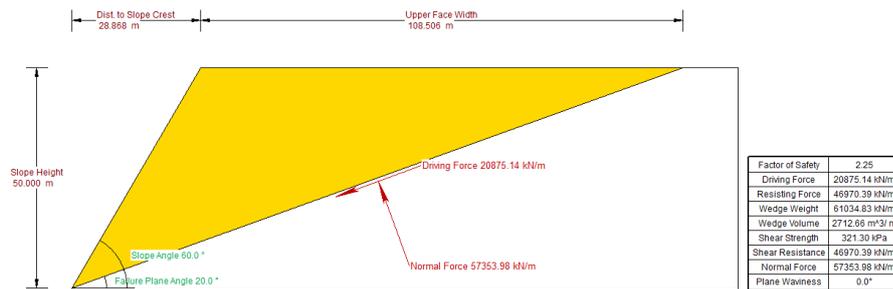


Figura A. 3 – Talude A: sem fenda e com água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Barton- Bandis

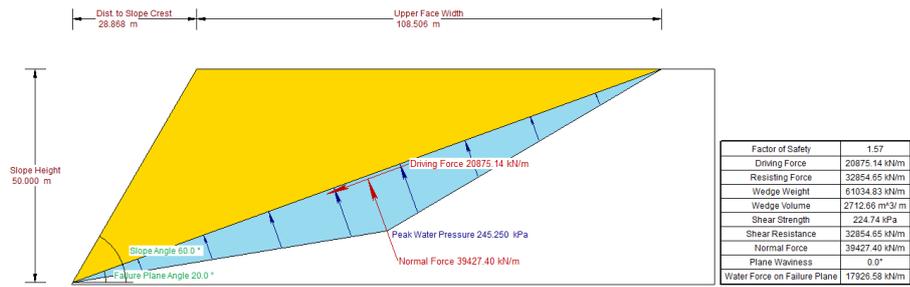


Figura A.4 – Talude A: sem fenda e com água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Barton-Bandis

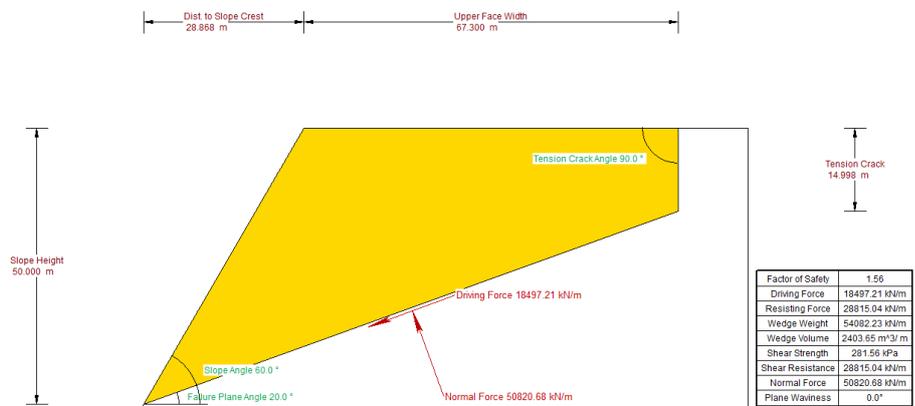


Figura A.5 – Talude A: com fenda e sem água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Mohr-Coulomb

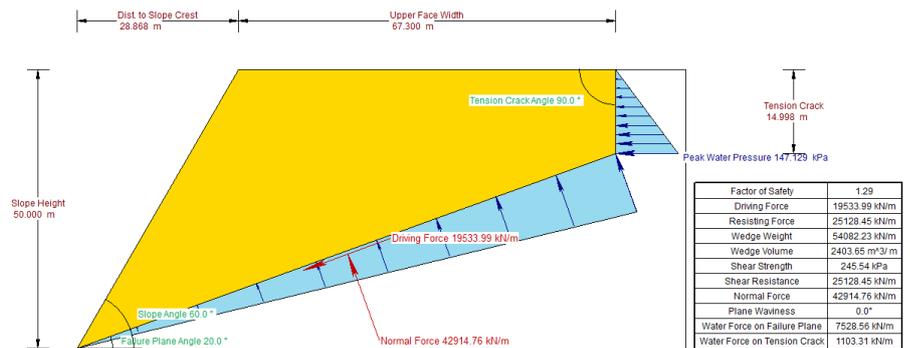


Figura A.6 – Talude A: com fenda e com água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Mohr-Coulomb

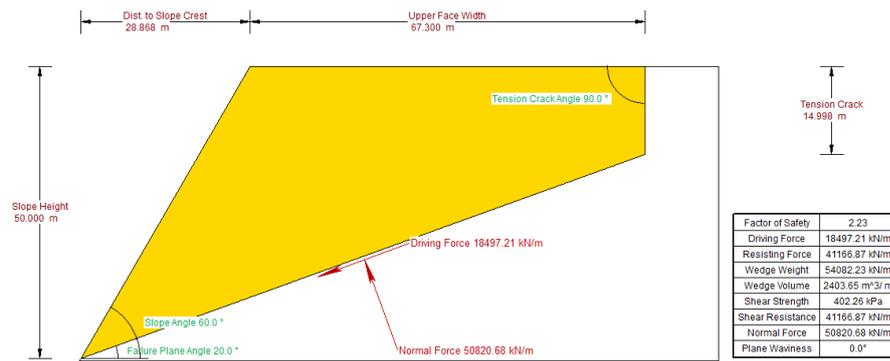


Figura A.7 – Talude A: com fenda e sem água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Barton-Bandis

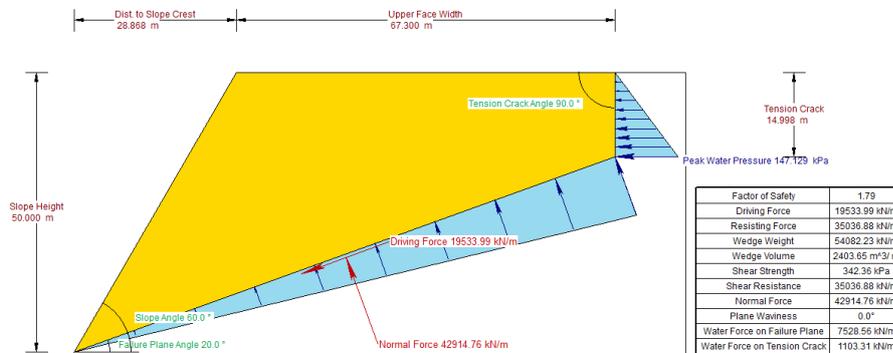


Figura A.8 – Talude A: com fenda e com água. Resultado análise do RocPlane pelo critério de Barton-Bandis

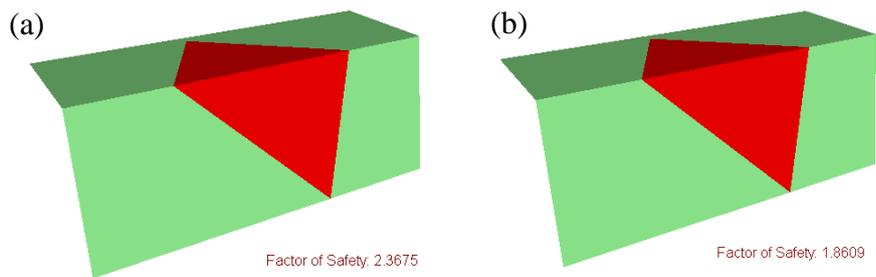


Figura A.9 – Talude B: sem fenda: (a) sem água. (b) com água. Resultado análise do Swedge pelo critério de Mohr-Coulomb

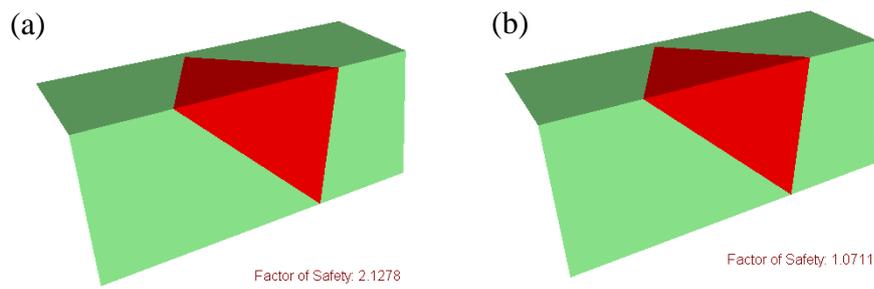


Figura A.10 – Talude B: sem fenda: (a) sem água. (b) com água. Resultado análise do Swedge pelo critério de Barton-Bandis

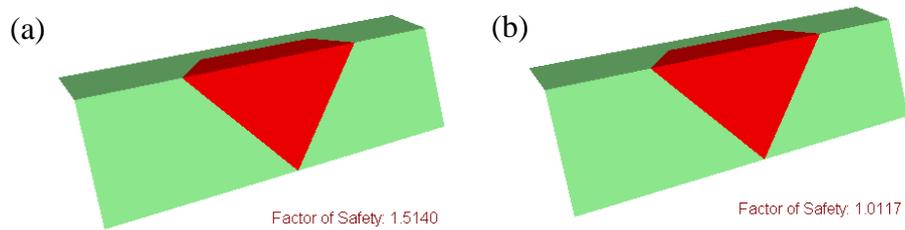


Figura A.11 – Talude C: com fenda: (a) sem água. (b) com água. Resultado análise do Swedge pelo critério de Mohr-Coulomb

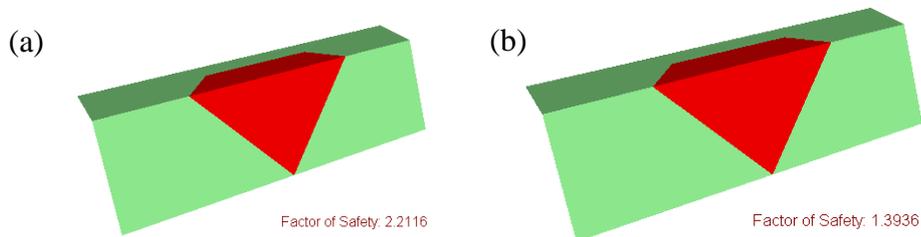


Figura A.12 – Talude C: com fenda: (a) sem água. (b) com água. Resultado análise do Swedge pelo critério de Barton-Bandis

ANEXO II: RESULTADOS GRÁFICOS DO DIPS PARA ANÁLISE CINEMÁTICA LIMITE DE TOMBAMENTO E VALIDAÇÃO PELO PROBENCH

```

*****
**Toppling Failure
*****
slope      Joint_Family    FS      optimized_Dip    PF[%]

1          1          Unl.     90.00            Unl.
1          2          Unl.     90.00            Unl.
1          3          Unl.     90.00            Unl.
1          4          Unl.     90.00            Unl.
1          5          0.99     51.00            47.77
2          1          Unl.     90.00            Unl.
2          2          Unl.     90.00            Unl.
2          3          Unl.     90.00            Unl.
2          4          Unl.     90.00            Unl.
2          5          0.99     51.00            47.77
3          1          Unl.     90.00            Unl.
3          2          Unl.     90.00            Unl.
3          3          Unl.     90.00            Unl.
3          4          Unl.     90.00            Unl.
3          5          1.0      43.00            49.64
4          1          Unl.     90.00            Unl.
4          2          Unl.     90.00            Unl.
4          3          Unl.     90.00            Unl.
4          4          Unl.     90.00            Unl.
4          5          1.0      43.00            49.64

unl. = unlikely failure
    
```

Figura A.II. 1 – Ângulo limite para cinemática de tombamento. Análise feita no ProBench.

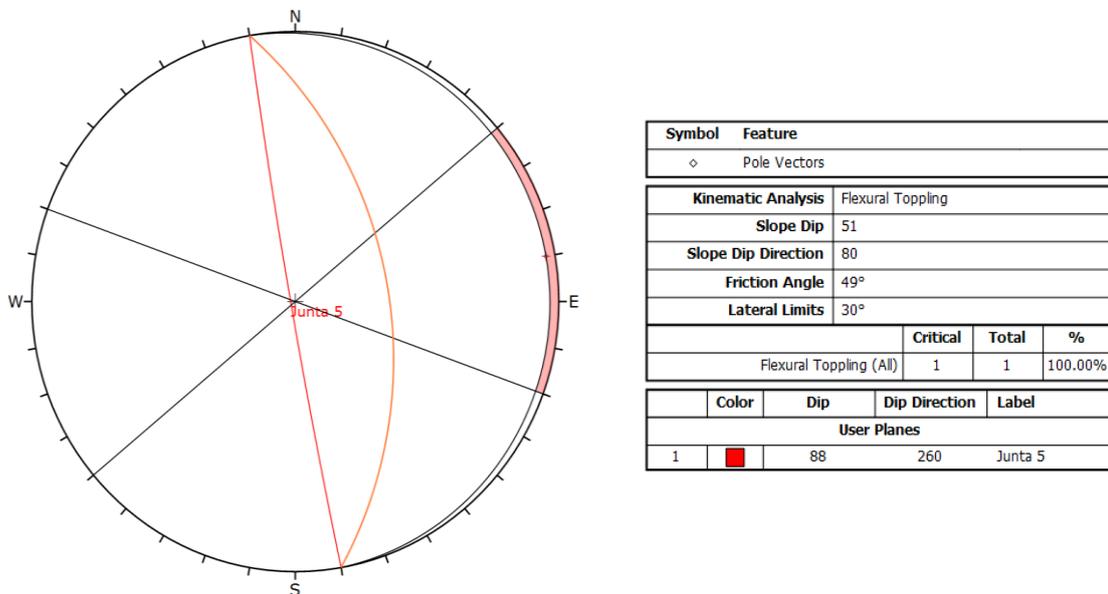
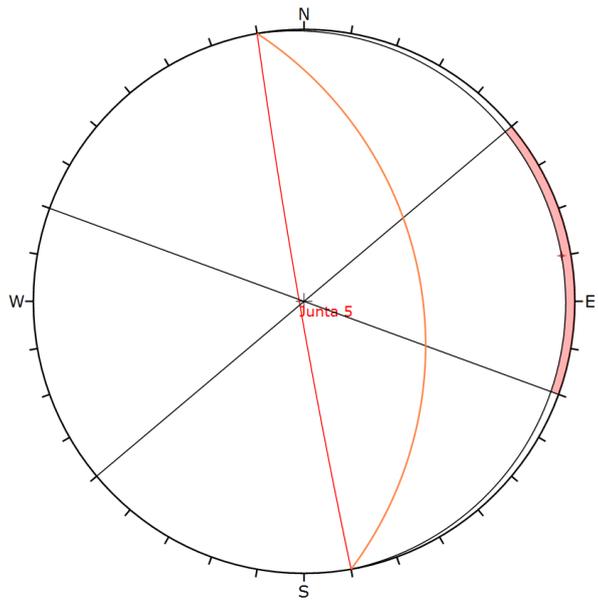


Figura A.II. 2 – Validação do ângulo de face cinemático limite para tombamento. Análise feita pelo Dips.



Symbol	Feature			
◇	Pole Vectors			
Kinematic Analysis Flexural Toppling				
Slope Dip	43			
Slope Dip Direction	80			
Friction Angle	41°			
Lateral Limits	30°			
	Critical	Total	%	
Flexural Toppling (All)		1	1	100.00%
	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1	■	88	260	Junta 5

Figura A.II. 3 – Validação do ângulo de face cinemático limite para tombamento.
Análise feita pelo Dips.