



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Análises Probabilísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco / CVRD

AUTOR: ROBERTO ALVARENGA ALVARES

ORIENTADORES: Prof. Dr. Romero César Gomes
Prof. Dr. Marcílio Sousa de Rocha Freitas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, outubro de 2004.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

*"The dream of yesterday
is the hope of today
and the reality of tomorrow"*

*Robert Goddard (1882-1945) American
scientist, modern father of the rocket*

AGRADECIMENTOS

A DEUS e meu Pai, que estiveram sempre ao meu lado lá de cima nesta caminhada. Minha mãe, Marília pelo apoio incondicional e por conseguir sempre me dar forças nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos Ronaldo e Simone por sempre acreditarem no meu potencial. À minha sobrinha, Marília, por nos dar sempre uma fonte a mais de alegria e ser capaz de ensinar, através de seu comportamento inocente, que tudo é possível quando se deseja algo.

À minha namorada Ju que sempre esteve ao meu lado mesmo quando me coloquei distante, você foi fundamental nesta conquista.

Àqueles verdadeiros amigos que por aqui conheci: William, Marcelo Pajé, Zé Bernardo, Deiva, Tumate, Wagner, Rodrigo Rodrigues, Cassius, Germano, Deilton, Tadeu, Alessandra, Adriana, Cidinha, Fernanda, Tatiana, Fabíola e tantos outros de quem possa ter me esquecido.

Aos verdadeiros amigos com quem morei por mais de um ano e àquela casa que considero parte de mim, mesmo não fazendo mais parte dela: República Masmorra. Obrigado pelos bons ensinamentos de companheirismo e fidelidade. Desejo a todos toda sorte do mundo.

“ Nasceu nesta casa um sentimento que não acaba que cresceu em meio à felicidade, de chamar você, de **AMIGO**, de **AMIZADE**,.....”

A todos los amigos de Santander, de PYENOR, Raúl, Ramón, Maria José y todos de la topografía, que me hicieron tener más gusto por la Geotecnia. Muchas gracias por todo lo que vivi con vosotros..... Y vamo.... Racing Santander.....

Aos meus orientadores Romero e Marcílio, pelos conhecimentos passados e apoio nestes meses de estudo e crescimento profissional.

A todos os professores responsáveis pelos novos conhecimentos adquiridos e a todos do programa de pós-graduação da UFOP, Róvia e companhia. Em especial ao professor Saulo Gutemberg por estar sempre disposto a me ajudar principalmente em relação ao software SLOPE/W.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Nos últimos anos a utilização sistemática de estudos geotécnicos aplicados à atividade mineradora no que diz respeito, principalmente, a projetos de cavas com taludes de grandes dimensões e alguns sistemas de contenção de resíduos vem se tornando cada vez mais presente.

A busca pela exploração máxima do bem mineral aliada à segurança necessária para que esta atividade seja viável nos faz buscar novas formas de análise que permitam alcançar estas diretrizes de forma otimizada.

Grande parte dos estudos desenvolvidos nesta área leva em consideração apenas a parte determinística das análises proferidas acerca da estabilidade dos taludes envolvidos. Porém, de maneira geral, os parâmetros índice das análises de estabilidade (principalmente a coesão e o ângulo de atrito dos materiais envolvidos) apresentam uma tendência a possuir uma grande variabilidade espacial, desta forma, os resultados obtidos através de análises puramente determinísticas apresentam uma limitação na acurácia e confiabilidade dos resultados obtidos.

Este trabalho utiliza ferramentas estatísticas e análises de confiabilidade no intuito de quantificar a probabilidade de uma ruptura ou o nível de risco associado a uma determinada situação de projeto. São feitas, primeiramente, as análises determinísticas dos fatores de segurança dos taludes da cava da Mina de Gongo Soco de propriedade da Companhia Vale do Rio Doce. São consideradas, nesta análise, diferentes condições de piezometria dos maciços analisados. Diversas ferramentas computacionais e de cálculo são utilizadas nestas análises (software SLOPE/W, Microsoft Excel, etc.).

Posteriormente às análises determinísticas utilizou-se para o mesmo problema análises estatísticas e da avaliação do índice de confiabilidade e da probabilidade de ruptura dos taludes analisados. Consideraram-se as mesmas seções e condições piezométricas tratadas anteriormente. Os resultados obtidos por este tipo de análise são comparados com aqueles obtidos pelas análises determinísticas prévias.

Palavras-chave: análises de estabilidade de taludes, análises estatísticas, confiabilidade.

ABSTRACT

In the recent years the systematic use of applied geotechnical studies to the minning activity, mainly, to the projects of diggings with great dimensions slopes and some systems of residues containment is becoming more present. The search for maximum mineral exploration with the necessary security for making this activity viable makes us to search new analysis forms to reach these lines in a optimized form.

Great part of the studies developed in this area takes in consideration only the conventional part of the analyses pronounced concerning the stability of slopes. However, in general, the index parameters of stability analyses (mainly the cohesion and the friction angle) usually present a great space variability; then, the results gotten through purely conventional analyses present a limitation in the reliability.

This work uses statistical tools and reliability analyses in intention to quantify the probability of a rupture or the level of risk associated with one determined project situation. At a first moment, the conventional analyses of the slopes security factors of the Mine of Gongo Soco are done. There are considered, in this analysis, different conditions of water level in the analyzed bulks. Different kind of computational tools and calculation methods are used in these analyses (software SLOPE/W, Microsoft Excel, etc.).

Later to the conventional analyses, for the same problem, statistical analyses, evaluation of the reliability index and the probability of rupture of analyzed slopes were made. The same previously sections and treated water level conditions had been considered. The results gotten for this type of analysis are compared with those gotten by the conventional analyses.

Keywords: slope stability analyses, statistical analyses, reliability.

SUMÁRIO

RESUMO	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XIII
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 - Aspectos Gerais.....	1
1.2 - Objetivos	3
1.3 - Estruturação do Trabalho.....	3
Capítulo 2 – Conceitos Básicos da Teoria de Confiabilidade	6
2.1 - Introdução.....	6
2.2 – Variáveis Aleatórias e Distribuições de Probabilidade.....	6
2.3 – Variabilidade de Parâmetros do Solo	8
2.4 – Confiabilidade de Sistemas de Engenharia.....	8
2.4.1 – Considerações iniciais	8
2.4.2 – Descrição do Problema.....	10
2.4.3 – Margem de Segurança.....	14
2.4.4 – Função Desempenho ou de Falha	14
2.5 – Métodos Probabilísticos	15
2.5.1 – Simulação de Monte Carlo	15
2.5.1.1 – Geração de Números Aleatórios.....	16
2.5.1.2 – Avaliação da Probabilidade de Falha.....	17
2.5.2 – Método do Segundo Momento de Primeira Ordem (FORM).....	19
2.5.2.1 – Transformação de Variáveis	20
2.5.2.2 – Ponto de Projeto.....	23

Capítulo 3 – Análises Estatísticas e de Confiabilidade de um Talude Genérico de Mineração.....	25
3.1 - Introdução.....	25
3.2 -Método de Análise.....	26
3.3 – Apresentação do Estudo de Caso.....	29
3.4 – Análise Determinística do Talude de Mineração	31
3.4.1 – Análise de Estabilidade de Taludes Usando o método das Fatias de Janbu Generalizado através do software Microsoft EXCEL	31
3.3.2 – Análise de Estabilidade de Taludes Usando o Software SLOPE/W.....	35
3.5 – Análise Probabilísticas do Talude de Mineração	37
3.5.1 – Análise Probabilística de Taludes Usando o Método Equivalente.....	38
3.5.2 – Análise Probabilística de Taludes Usando o Método das Fatias de Janbu Generalizado Através do Software Microsoft EXCEL.....	41
3.5.3 – Análise Probabilística de Taludes Usando o Método Proposto por Duncan (2000).....	43
3.4.4 – Análise Probabilística de Taludes através da simulação de Monte Carlo (Software SLOPE/W)	50
3.6 – Síntese e Discussão geral dos Resultados.....	55
 Capítulo 4 – Estudo de Caso: Taludes da Mina de Gongo Soco/CVRD .57	
4.1 - Introdução.....	57
4.2 – Histórico e Situação Atual da Mina de Gongo Soco	58
4.3 – Contexto Geológico Local.....	61
4.3.1 – Supergrupo Rio das Velhas – Grupo Nova Lima.....	63
4.3.2 – Supergrupo Minas.....	63
4.4 – Modelação Geomecânica dos Maciços Locais.....	66
4.5 – Modelação Hidrogeológica da Mina de Gongo Soco.....	69

4.6 – Síntese Geral dos Estudos.....	71
Capítulo 5 – Caracterização Geotécnica e Determinação de Parâmetros para as Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo	
Soco.....	72
5.1 – Investigação Geotécnica em Laboratório.....	72
5.1.1 – Ensaios em Solos	72
5.1.2 – Ensaios em Rochas	75
5.2 – Investigação Geotécnica em Campo	77
5.3 – Critérios Adotados para as Análises de Estabilidade.....	79
5.3.1 – Condicionantes Geológicos e Hidrogeológicos.....	79
5.4 – Seções de Referência e Condições de NA Adotadas para as Análises	82
5.5 – Parâmetros Geotécnicos Adotados	84
Capítulo 6 – Análises Determinísticas dos Taludes da Mina de Gongo	
Soco.....	88
6.1 – Introdução	88
6.2 – Análises de Estabilidade.....	89
6.3 – Análises de Estabilidade dos Taludes sob Desmonte por Explosivos.....	97
Capítulo 7 – Análises Probabilísticas dos Taludes da Mina de Gongo	
Soco.....	99
7.1 – Introdução	99
7.2 – Parâmetros Utilizados nas Análises de Confiabilidade	100
7.3 – Análises de Confiabilidade dos Taludes.....	103
7.3.1 – Planilha Estatística – Seção 646406.....	103
7.3.2 – Programa SLOPE/W – Seção 646406.....	108
7.3.3 – Comparação dos Resultados obtidos para a seção 646406	110
7.3.4 – Análises de Confiabilidade dos demais taludes da cava de Gongo	
Soco	111

Capítulo 8 – Conclusões, Recomendações Finais e Sugestões de Pesquisas Adicionais.....	114
8.1 – Conclusões.....	114
8.2 – Recomendações Finais e Sugestões para Pesquisas Adicionais	118
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2 – Conceitos Básicos da Teoria de Confiabilidade	6
Figura 2.1 Funções de densidade de probabilidade $f_x(x)$ e $f_y(y)$	12
Figura 2.2a Efeito da posição relativa entre $f_x(x)$ e $f_y(y)$ na P_f	12
Figura 2.2b Efeito da dispersão em $f_x(x)$ e $f_y(y)$ na P_f	13
Figura 2.3 Função de distribuição de probabilidade da margem de segurança M ..	14
Capítulo 3 – Análises Estatísticas e de Confiabilidade de um Talude Genérico de Mineração	25
Figura 3.1 Configuração do talude de mineração analisado	26
Figura 3.2 Localização do ângulo α_i na configuração do talude	28
Figura 3.3 Resultado do programa SLOPE/W para a análise do talude genérico (Janbu Modificado).....	31
Figura 3.4 Resultados das análises de estabilidade para o talude genérico pelo programa SLOPE/W	31
Figura 3.5 Distribuição de forças atuantes numa fatia genérica	32
Figura 3.6 Influência de cada parâmetro na $V[FS]$	35
Figura 3.7 Dados de saída do SLOPE/W para análise probabilística do problema pelo método de Bishop Modificado (n=3 variáveis).....	46
Figura 3.8 Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Janbu Modificado (n=3 variáveis).....	46
Figura 3.9 Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Spencer (n=3 variáveis).....	47

Figura 3.10 Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Bishop Modificado (n=3 variáveis).....	47
Figura 3.11 Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Janbu Modificado (n=5 variáveis).....	48
Figura 3.12 Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Spencer (n=5 variáveis).....	48

Capítulo 4 – Estudo de Caso: Taludes da Mina de Gongo Soco/CVRD .51

Figura 4.1 Localização da Mineração Gongo Soco no Quadrilátero Ferrífero.....	51
Figura 4.2 Vista aérea da Mina de Gongo Soco evidenciando os aspectos fisiográficos.....	52
Figura 4.3 Vista geral da Mina de Gongo Soco.....	53
Figura 4.4 Planta de tratamento de minério (primeiro plano) e cava (ao fundo)	54
Figura 4.5a Seções típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco	56
Figura 4.5b Seções típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco.....	56
Figura 4.6 Classificação geomecânica dos taludes da Mina de Gongo Soco.....	61
Figura 4.7 Setorização geomecânica da Mina de Gongo Soco	62

Capítulo 5 – Caracterização Geotécnica e Determinação de Parâmetros para as Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo Soco.....67

Figura 5.1 Resultados dos ensaios triaxiais CU em amostras de filtro (cisalhamento paralelo à foliação).....	69
Figura 5.2 Resultado dos ensaios de compressão triaxial em amostra de itabirito (tensão confinante de 16 Mpa).	71
Figura 5.3 Localização das seções de referência adotadas nas análises da	

estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco.....	82
---	----

Capítulo 6 – Análises Determinísticas dos Taludes da Mina de Gongo

Soco.....	87
Figura 6.1 Cálculo do FS (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 20m de profundidade através da planilha.....	89
Figura 6.2 Cálculo do FS (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 40m de profundidade através da planilha.....	90
Figura 6.3 Cálculo do FS (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 100m de profundidade através da planilha	91
Figura 6.4 Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 20m....	92
Figura 6.5 Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 40m ...	93
Figura 6.6 Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 100m	94

Capítulo 7 – Análises Estatísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco

Figura 7.1 Superfície de ruptura e litologias atravessadas (seção 646406 NA 20m).....	100
Figura 7.2 Resultados das análises de confiabilidade - Seção 646406 NA 20m.....	108
Figura 7.3 Resultados das análises de confiabilidade - Seção 646406 NA 40m	108
Figura 7.4 Resultados das análises de confiabilidade - Seção 646406 NA 100m..	109

LISTA DE TABELAS

Capítulo 3 – Análises Estatísticas e de Confiabilidade de um Talude Genérico de Mineração.....	25
Tabela 3.1 Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias.....	26
Tabela 3.2 Cálculo do fator de segurança para o talude de mineração analisado , FS = 1,194.....	29
Tabela 3.3 Cálculo de V[FS] através do método equivalente ao Segundo Momento de Primeira Ordem	34
Tabela 3.4 Tabela de cálculo do índice de confiabilidade para o talude de mineração analisado, $\beta = 1,245$	38
Tabela 3.5 Variação do fator de segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Bishop Modificado	40
Tabela 3.6 Variação do fator de segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Janbu Modificado	41
Tabela 3.7 Variação do fator de segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Spencer.....	42
Tabela 3.8 Tabela de distribuição normal – Duncan (2000).....	43
Tabela 3.9 Resultados das análises no talude genérico de mineração considerado..	49
Tabela 3.10 Resultados das análises de (Guedes, 1997) para o mesmo talude	49
Capítulo 5 – Caracterização Geotécnica e Determinação de Parâmetros para as Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo Soco.....	67
Tabela 5.1 Resultados dos ensaios de caracterização	68

Tabela 5.2 Resultados dos ensaios de compressão triaxial em litologias típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco	71
Tabela 5.3 Síntese dos resultados dos ensaios CD e triaxiais.....	71
Tabela 5.4 Métodos convencionais de análise da estabilidade de taludes.....	75
Tabela 5.5 Características de alguns métodos de equilíbrio limite não rigorosos (de Campos, 1985)	76
Tabela 5.6 Características de alguns métodos de equilíbrio limite rigorosos (de Campos, 1985).....	76
Tabela 5.7 Correlações equações x incógnitas para o método de Bishop Simplificado	77
Tabela 5.8 Correlações equações x incógnitas para o método de Spencer	78
Tabela 5.9 Condições de água nos taludes da Mina de Gongo Soco	83
Tabela 5.10 Resultados de ensaios CD em litologias típicas do QF de Minas Gerais	84
Tabela 5.11 Resultados de ensaios triaxiais em litologias típicas do QF de Minas Gerais	84
Tabela 5.12 Ângulos de bancadas dos taludes da Mina de Gongo Soco.....	85
Tabela 5.13 Parâmetros geotécnicos adotados para as análises de estabilidade.....	86

Capítulo 6 – Análises Determinísticas dos Taludes da Mina de Gongo

Soco	87
Tabela 6.1 Resultados das análises determinísticas de estabilidade da seção 646406 (diferentes posições do NA) através do software SLOPE/W e da planilha eletrônica.....	94
Tabela 6.2 Resultados de análises de estabilidade (Taludes da Mina de Gongo Soco).....	95
Tabela 6.3 Resultados das análises Pseudo-estáticas (Taludes da Mina de Gongo	

Soco).....	97
------------	----

Capítulo 7 – Análises Estatísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco .98

Tabela 7.1 Valores típicos do coeficiente de variação.....	99
Tabela 7.2 Cálculo de β (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 20m de profundidade através da planilha.....	104
Tabela 7.3 Cálculo de β (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 40m de profundidade através da planilha.....	105
Tabela 7.4 Cálculo de β (Método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 100m de profundidade através da planilha	106
Tabela 7.5 Comparação entre os resultados das análises de confiabilidade – seção 646406 – através do SLOPE/W e da planilha eletrônica (Low & Tang, 1997).....	110
Tabela 7.6 Resultados das análises de confiabilidade dos taludes de Gongo Soco.....	111

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Aspectos Gerais

A utilização sistemática dos estudos geotécnicos em atividades de mineração tem sido cada vez mais corrente, particularmente no contexto de projetos de cavas com taludes de grandes dimensões e de sistemas de disposição de resíduos sob a forma de pilhas e/ou barragens de contenção de rejeitos.

Neste contexto, estudos geotécnicos detalhados devem subsidiar a proposição de taludes de grande porte em minas a céu aberto, visando a exploração máxima do bem mineral de interesse. Isto implica, muitas vezes, em se extremar a condição de lavra, incluindo a possibilidade de se conviver com eventuais rupturas localizadas do maciço. Neste sentido, é comum a adoção de menores fatores de segurança (tipicamente $FS = 1,30$ nestas condições) que aqueles convencionalmente prescritos em análises de estabilidade de outras obras geotécnicas de grande porte (tipicamente $FS = 1,50$).

Uma sistemática integrada de projetos geotécnicos de taludes de mineração deve englobar os condicionantes relativos à viabilidade econômica do projeto, o nível de responsabilidade associado a cada talude específico de lavra e a variabilidade espacial dos parâmetros geológico-geotécnicos locais (Castro, 2004). De forma específica, os parâmetros de resistência das análises de estabilidade (particularmente a coesão e o ângulo de atrito dos materiais envolvidos) tendem a apresentar uma elevada variabilidade espacial, limitando sobremaneira a acurácia e a confiabilidade nos resultados obtidos através da aplicação dos chamados métodos determinísticos de análise, metodologias convencionalmente adotadas na prática da engenharia geotécnica.

Nestas abordagens, o fator de segurança estimado não pode quantificar a probabilidade de ruptura ou o nível de risco associado a uma situação de projeto particular. Uma aproximação probabilística dos índices geotécnicos constitui uma alternativa para tratar as incertezas relativas aos valores de referência adotados para os parâmetros geotécnicos. O desenvolvimento de procedimentos de projeto baseados no risco, nos quais os engenheiros possam combinar experiência prática, julgamento e informações estatísticas é benéfico para a análise de estabilidade de taludes considerando um critério de risco admissível (Tang, et al., 1976).

As incertezas relativas às propriedades dos maciços, condições ambientais, geometria dos taludes e hipóteses simplificadoras adotadas nos modelos teóricos impõem limitações à plena adoção dos resultados obtidos a partir das análises determinísticas. As análises probabilísticas possibilitam a quantificação destas incertezas associadas ao valor de FS obtido, através do índice de confiabilidade β . Este índice constitui uma medida da confiabilidade do valor de FS, permitindo quantificar também a probabilidade de ruptura P_r do talude investigado.

As análises probabilísticas da estabilidade de taludes somente são possíveis quando se dispõe de um acervo adequado de informações relativas aos solos locais, por meio de campanhas de ensaios de laboratório e de campo. Por outro lado, estas análises serão tanto mais representativas e consistentes quanto maior for o número de incertezas do problema incorporadas à solução adotada. Em outras palavras, o índice de confiabilidade constitui sempre um parâmetro relativo e, assim, as análises probabilísticas, como qualquer outra ferramenta de análise, não podem prescindir do julgamento subjetivo da equipe técnica do projeto.

Em se tratando de taludes de mineração e levando-se em conta os impactos resultantes de uma ruptura global neste tipo de obra geotécnica, o tratamento determinístico-probabilístico deve constituir, naturalmente, a base de uma abordagem geotécnica do problema.

1.2 – Objetivos

Esta concepção integrada da análise de taludes de cavas de mineração foi implementada para o caso dos taludes da Mina de minério de ferro de Gongo Soco, propriedade da Companhia Vale do Rio Doce, localizada no município de Barão de Cocais, MG. A jazida possui reservas de 74,5 milhões de toneladas de hematita e 38 milhões de toneladas de itabirito e a exploração em curso resultou em uma cava com 1,3 km de extensão e 700 m de largura, com taludes de alturas de até 270 m na parede norte e de até 100 m na parede sul. As condições topográficas e hidrogeológicas locais condicionam criticamente o atual modelo de lavra.

As análises determinístico-probabilísticas contemplaram cinco seções representativas da cava, formuladas com base num amplo programa de investigação de campo e de laboratório, desenvolvido no sentido de englobar todas as litologias presentes de uma seqüência estratigráfica local bastante complexa, típica do arcabouço estrutural da chamada região do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais.

Nestes estudos, foram adotados diferentes métodos probabilísticos, mediante a implementação de planilhas eletrônicas específicas e mediante a utilização de programas comercialmente disponíveis. Para uma prévia avaliação/validação destas ferramentas e propostas, procedeu-se inicialmente a uma reanálise de um estudo de caso disponível na literatura técnica nacional (Guedes, 1997).

1.3 – Estruturação do Trabalho

O trabalho foi subdividido nos seguintes capítulos e com a seguinte abordagem de tópicos:

- capítulo 2: apresentação de alguns conceitos básicos sobre análises probabilísticas e de confiabilidade em sistemas de engenharia, bem como sobre os métodos probabilísticos mais utilizados para análise destes problemas;

- capítulo 3: apresentação de um estudo de caso de análises de estabilidade de um talude de mineração (Guedes, 1997), com as correspondentes análises determinísticas e análises de confiabilidade estabelecidas com base na utilização das ferramentas desenvolvidas neste trabalho; adicionalmente, os resultados destas análises para o talude hipotético apresentado são comparados com os resultados obtidos por Guedes (1997);

- capítulo 4: apresentação da natureza, do histórico e das características gerais da Mina de Gongo Soco e dos condicionantes geológico-geotécnicos, geomecânicos e hidrogeológicos dos taludes da cava; neste capítulo, são abordados ainda a geologia regional e a inserção da mina no contexto estratigráfico da região do chamado Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais;

- capítulo 5: apresentação dos estudos de investigação geotécnica e hidrogeológica dos taludes da mina de Gongo Soco, que incluíram um amplo programa de ensaios de campo (sondagens rotativas) e de laboratório (em solos e em rochas), bem como o monitoramento piezométrico da cava e a execução de ensaios hidrodinâmicos realizados em poços de investigação; bem como a definição das seções, dos parâmetros e das concepções adotadas nas análises;

- capítulo 6: apresentação dos resultados das análises preliminares da estabilidade dos taludes da cava utilizando abordagens determinísticas, admitindo valores constantes para os parâmetros das diferentes litologias típicas da área e considerando cinco seções típicas dos taludes de cava e três diferentes cenários da piezometria dos maciços;

- capítulo 7: apresentação das correspondentes análises probabilísticas e da avaliação do índice de confiabilidade e da probabilidade de ruptura dos taludes da cava da Mina de Gongo Soco, para as mesmas seções e condições piezométricas tratadas anteriormente; neste capítulo, são feitas também comparações dos resultados obtidos pelas análises probabilísticas e pelas análises determinísticas prévias;

- capítulo 8: apresentação das principais conclusões do trabalho, da avaliação final das condições de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco e de algumas sugestões de pesquisas complementares às do presente trabalho.

Capítulo 2

Conceitos Básicos da Teoria de Confiabilidade

2.1 - Introdução

A teoria da confiabilidade não tem sido uma ferramenta de aplicação convencional em engenharia geotécnica. Existem duas razões básicas para isto:

- A teoria da confiabilidade envolve termos e conceitos que não são familiares à maioria dos engenheiros geotécnicos.
- o uso desta teoria requer mais dados, tempo ou esforço do que as práticas correntes na solução de projetos

Entretanto, os princípios e conceitos da teoria das probabilidades podem ser aplicados em problemas geotécnicos, com pertinência similar a das metodologias convencionais. Trabalhando-se com a mesma base de dados e os mesmos tipos de julgamentos em engenharia que são usados nas análises convencionais, é possível fazer avaliações aproximadas, porém, de grande aplicabilidade prática. Neste contexto, o que se pretende é a utilização conjunta de fatores de segurança e confiabilidade como medidas complementares de um projeto aceitável.

2.2 – Variáveis aleatórias e distribuições de probabilidade

Em Estatística, na maioria das vezes, experimentos aleatórios geram resultados não numéricos e, assim, a sua avaliação quantitativa implica a associação ou a atribuição de um número a cada resultado obtido. Essa característica numérica associada/atribuída a cada resultado (ponto amostral do espaço amostral considerado) é chamada de **variável aleatória**. As variáveis aleatórias podem ser discretas ou contínuas dependendo de se as mesmas possuem um espaço amostral contável ou não.

Sendo x uma variável aleatória qualquer, o comportamento probabilístico do experimento aleatório é caracterizado pela determinação da **distribuição de probabilidades** das ocorrências de todos os valores de x , a qual pode ser estabelecida por meio de uma função matemática chamada de **função da densidade de probabilidade**, usualmente designada por $f(x)$. A distribuição de uma variável aleatória contínua pode ser encarada como um refinamento de uma distribuição discreta, a partir de mensurações feitas inicialmente com uma aproximação grosseira. A medida que se aumenta a precisão das medidas, pode-se trabalhar com um número maior de classes até se obter, no limite, uma curva contínua.

De acordo com Peterson (1999), aplicações de análises probabilísticas para estabilidade de taludes devem assumir parâmetros de entrada independentes e não correlacionados. A independência das variáveis, juntamente com o modelo assumido, produzem resultados apropriados durante o processo de simulação.

Os tipos de distribuição que mais comumente têm representado as funções de distribuição dos parâmetros de entrada de problemas geotécnicos são as distribuições tipo normal, lognormal e beta.

Por exemplo, Chandler (1996) adotou como parâmetros de entrada em problemas de análise de estabilidade a coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), peso específico seco (γ), peso específico saturado (γ_{sat}) e altura do talude (H), que foram tratados como normalmente distribuídos e como variáveis aleatórias independentes.

Na análise probabilística de um talude de mineração feita por Sandroni e Sayão (1992), as variáveis consideradas aleatórias foram coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), peso específico seco (γ), peso específico saturado (γ_{sat}) e a piezometria local.

Num terceiro exemplo, o da análise de confiabilidade da Barragem de Santa Branca realizada por Dell'Avanzi (1995), os pesos específicos seco e saturado (γ e γ_{sat}) foram admitidos como sendo variáveis determinísticas pela pequena variabilidade observada.

A coesão (c), ângulo de atrito (ϕ) e piezometria foram considerados como variáveis aleatórias.

2.3 – Variabilidade dos parâmetros do solo

Para a consideração das incertezas na estabilidade de taludes, os parâmetros de entrada são definidos como variáveis aleatórias. Cada uma destas variáveis aleatórias é caracterizada pela média (μ), desvio padrão (σ), e uma função de distribuição de probabilidade $f(x)$.

As incertezas nas propriedades do solo vêm tanto da dispersão dos dados quanto dos erros sistemáticos de modelagem. A dispersão nos dados resulta da variabilidade no perfil dos solos ou nos erros dos testes aleatórios, enquanto as discrepâncias sistemáticas decorrem dos eventos viciosos nos processos de amostragem ou nos métodos de teste. Os erros sistemáticos, por outro lado, são derivados da amostragem inapropriada e dos métodos de teste e devem ser eliminados.

2.4 – Confiabilidade de sistemas de engenharia

2.4.1 – Considerações Iniciais

As incertezas em Engenharia podem ser atribuídas à ambigüidade na definição das variáveis e parâmetros dos sistemas em estudo e suas relações. As fontes causadoras destas ambigüidades incluem:

- aleatoriedade física;
- incertezas estatísticas no uso de informações limitadas ao estimar as características de variáveis e parâmetros;
- incertezas de modelos devido a suposições simplificadas em modelos de análise, métodos simplificados e representações idealizadas de desempenhos reais.

Além de ser importante na análise e concepção de projetos de engenharia, a confiabilidade de um projeto é comumente ligada a algum critério de desempenho. A necessidade da confiabilidade está baseada na confirmação da presença das incertezas nas definições, entendimento, modelagem e prognóstico do comportamento dos sistemas que modelam o projeto.

A segurança absoluta de um sistema não pode ser garantida devido à imprevisibilidade das condições de demanda do sistema, incapacidade humana em obter e expressar propriedades e desempenho do sistema com exatidão, além de fatores humanos, erros e omissões. Todavia, a probabilidade de desempenhos inaceitáveis pode ser limitada a um nível razoável.

Num sentido amplo, o objetivo principal de um projeto de engenharia é o de garantir o desempenho de um dado sistema, aliado às condições de sua viabilidade econômica. Garantir este objetivo, porém, não é um problema simples, principalmente para grandes sistemas de engenharia, uma vez que a condição de risco está sempre implícita na solução.

No caso de uma estrutura, a segurança é claramente uma função do carregamento máximo (ou combinação de carregamentos) que pode ser imposto à mesma, ao longo de sua vida útil. A segurança estrutural também dependerá da resistência ou da capacidade de carga da estrutura ou dos seus componentes. Como o carregamento máximo e a capacidade de carga real de uma estrutura são difíceis de prever com exatidão, e muitas previsões estão sujeitas às incertezas, a garantia absoluta da segurança da estrutura não é possível. Na realidade, a segurança pode ser garantida somente em termos da probabilidade de que a resistência disponível (ou capacidade estrutural) está adequada ao carregamento máximo da vida da estrutura.

Tais problemas de confiabilidade também são comuns a muitos outros sistemas de engenharia, envolvendo a determinação e a garantia da adequação de um sistema sobre sua vida útil. Este problema pode ser independente do tempo ou não, como no caso de uma estrutura sujeita a tensões de fadiga.

Portanto, pode-se definir confiabilidade como sendo a medida probabilística da garantia do bom desempenho. Isto é, sob a luz da incerteza, a garantia de desempenho adequado somente pode ser exposta efetivamente em termos de probabilidade.

2.4.2 – Descrição do problema

Os problemas de confiabilidade em engenharia podem ser formulados como a determinação da capacidade de um sistema para atender determinados requisitos (suprimento/demanda).

Na verdade, a determinação do suprimento disponível, assim como a máxima demanda não são problemas simples. É necessário que sejam feitas estimativas para estes fins, sendo que nesses processos (que podem incluir métodos de julgamentos), as incertezas são inevitáveis pela simples razão de que as informações em engenharia são invariavelmente incompletas. Dessa forma, o suprimento disponível e a demanda real não podem ser determinados de maneira precisa, mas como faixas ou populações de possíveis suprimentos e demandas.

Os suprimentos disponíveis e as demandas necessárias podem ser modelados como variáveis aleatórias. Essas variáveis aleatórias são assim definidas:

- X: capacidade de suprimento
- Y: demanda requerida

Desta forma, o objetivo da análise de confiabilidade é assegurar o evento $(X > Y)$ durante toda a vida útil ou período específico do sistema. Esta garantia só é possível em termos da probabilidade $P(X > Y)$.

Conhecidas as funções densidade de probabilidade acumuladas $F_X(x)$ ou $f_x(x)$ e $F_Y(y)$ ou $f_y(y)$, a probabilidade de falha pode ser formulada como se segue:

$$P_f = P(X < Y) = \sum_y P(X < Y / Y = y)P(Y = y) \quad (2.1)$$

Se o suprimento e a demanda, X e Y, são estatisticamente independentes, isto é:

$$P(X < Y / Y = Y) = P(X < Y) \quad (2.2)$$

A equação (2.1), para X e Y variáveis aleatórias contínuas, pode ser reescrita como a convolução com respeito a y:

$$P_f = \int_0^{\infty} F_x(y) f_y(y) dy \quad (2.3)$$

A probabilidade de falha também pode ser formulada pela convolução com respeito à variável x:

$$P_f = \int_0^{\infty} [1 - F_y(x)] f_x(x) dx \quad (2.4)$$

A confiabilidade correspondente, portanto, é:

$$C = 1 - P_f \quad (2.5)$$

Em termos gráficos, a sobreposição das curvas $f_x(x)$ e $f_y(y)$ representa a medida da probabilidade de falha P_f (Figura 2.1).

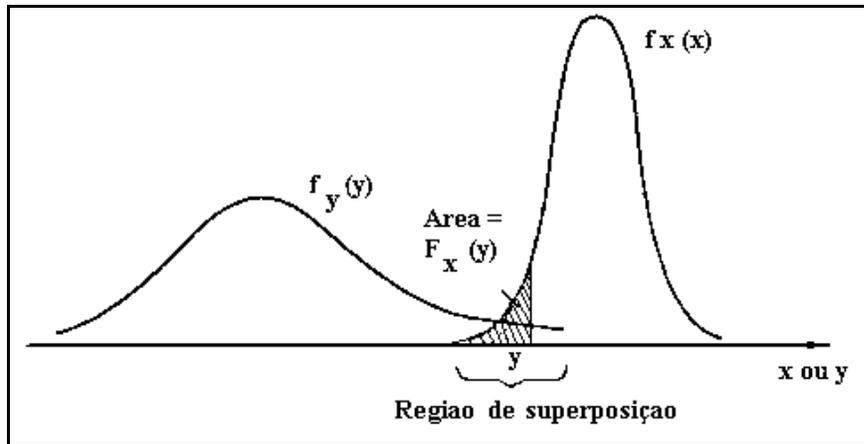


Figura 2.1: Funções de densidade de probabilidade $f_x(x)$ e $f_y(y)$

Pode - se observar que:

- A região de sobreposição depende das posições relativas das curvas $f_x(x)$ e $f_y(y)$ (fig. 2.2a), ou seja, quanto mais separadas as curvas, diminui o valor de P_f , assim como aumenta quando as curvas se aproximam. A posição relativa entre $f_x(x)$ e $f_y(y)$ pode ser medida pelo coeficiente μ_x/μ_y ou “fator de segurança central”; ou ainda pela diferença $(\mu_x - \mu_y)$ conhecido como “margem de segurança”;

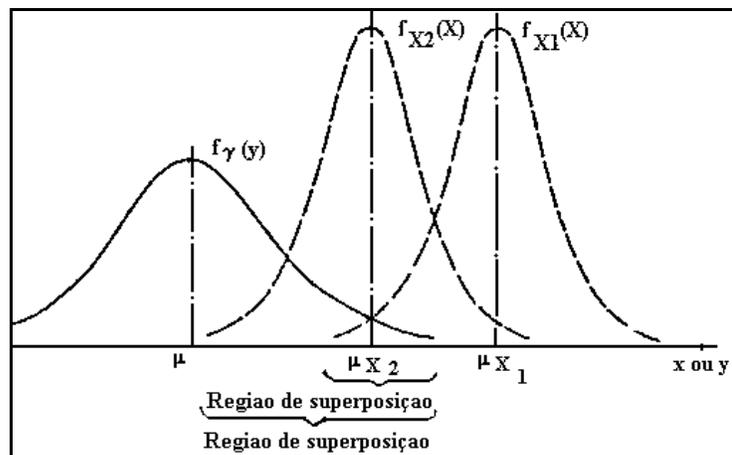


Figura 2.2.a: Efeito da posição relativa entre $f_x(x)$ e $f_y(y)$ na P_f

- A região de sobreposição também depende do grau de dispersão em $f_x(x)$ e $f_y(y)$ (fig.2.2.b). Essas dispersões podem ser expressas em termos dos coeficientes de variação δ_x e δ_y (relação entre o desvio padrão e a média).

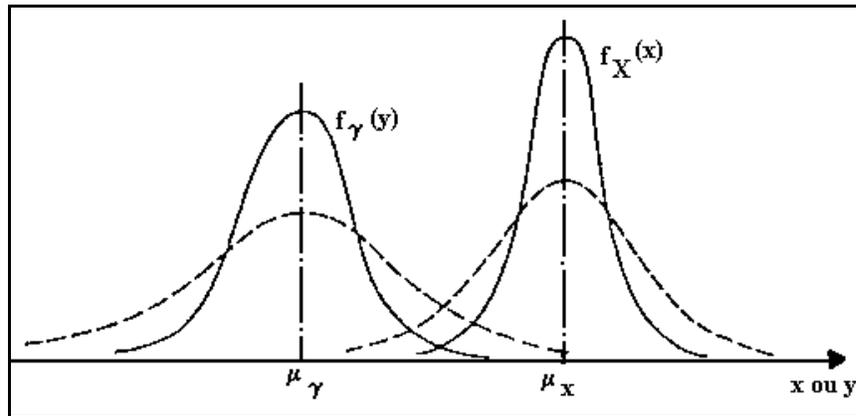


Figura 2.2.b: Efeito da dispersão em $f_x(x)$ e $f_y(y)$ na P_f

Nas equações 2.3 e 2.5, admite-se que X e Y são variáveis aleatórias estatisticamente independentes. Em geral estas variáveis podem ser correlacionadas, tal que:

$$P(Y < X / X = X) \neq P(Y < X)$$

$$P(X < Y / Y = Y) \neq P(X < Y)$$

Para estes casos tem - se a probabilidade de falha dada por:

$$P_f = \int_0^{\infty} \left[\int_0^y f_{x,y}(x, y) dx \right] dy \quad (2.6)$$

A confiabilidade correspondente é:

$$C = \int_0^{\infty} \left[\int_0^x f_{x,y}(x, y) dy \right] dx \quad (2.7)$$

2.4.3 – Margem de segurança

O problema de suprimento - demanda acima pode ser formulado também em termos de margem de segurança, $M = X - Y$. Como X e Y são variáveis aleatórias, M também é uma variável aleatória com correspondente função de distribuição de probabilidades $f_M(M)$.

Pode - se ver, portanto que, nesse caso, a falha corresponde ao evento ($M < 0$), sendo a probabilidade de falha dada por:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_M(m) dm = F_M(0) \quad (2.8)$$

Isto é graficamente representado pela área abaixo de $f_M(m)$ antes do valor zero (Fig.2.3).

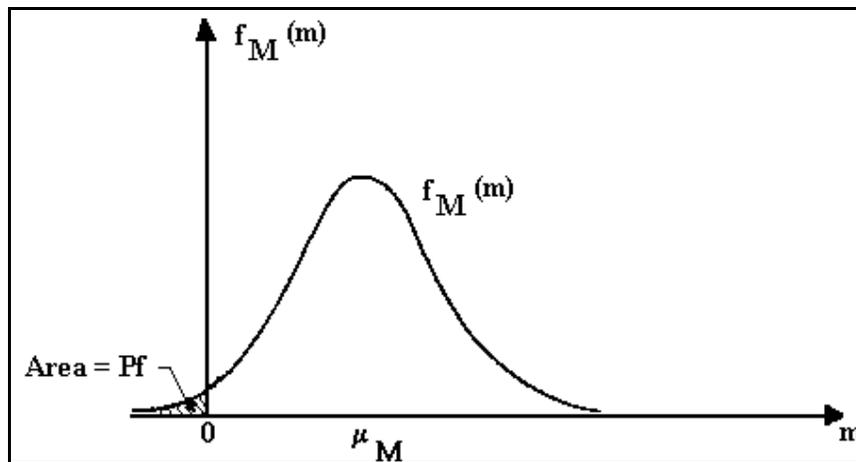


Figura 2.3: Função de distribuição de probabilidade da margem de segurança M

2.4.4 – Função Desempenho ou de Falha

A seguir é apresentada uma generalização do procedimento envolvendo duas variáveis aleatórias x e y , já que a confiabilidade de um sistema qualquer pode envolver múltiplas

variáveis aleatórias. Para definir o desempenho de uma estrutura, que vai depender das propriedades do sistema, uma “função desempenho” é utilizada:

$$g(x) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2.9)$$

onde $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ é o vetor das variáveis básicas de cálculo e a função $g(x)$ é aquela que determina o desempenho do sistema. O estado limite (ou desempenho limite) do sistema pode ser definido como $g(x) = 0$ (Ang & Tang, 1984). Deste modo, tem-se que:

$[g(x) > 0]$: “região de segurança”

$[g(x) < 0]$: “região de falha”

A equação do estado limite, $g(x) = 0$, é representada geometricamente por uma superfície n – dimensional que pode ser chamada de “superfície de falha”. A região de segurança, $g(x) > 0$, encontra-se em um lado desta superfície oposto ao da região de falha, $g(x) < 0$ (Ang & Tang, 1984).

2.5 – Métodos probabilísticos

2.5.1 – Simulação de Monte Carlo

Simulação é um processo de reprodução do mundo real baseado em um conjunto de hipóteses e modelos concebidos teórica ou experimentalmente. Na prática, a simulação teórica é feita numericamente, facilitada pelo advento dos computadores.

Para os propósitos de engenharia, a simulação pode ser aplicada para prever ou estudar tanto o desempenho quanto a resposta de um sistema. Com uma série de valores prescritos para os parâmetros de um sistema (variáveis de projeto), o processo de simulação produz uma medida específica de desempenho ou resposta. Através de simulações repetidas, a sensibilidade do desempenho do sistema para variação nos seus

parâmetros pode ser examinada ou avaliada. Através deste procedimento, a simulação pode ser usada para avaliar formas alternativas ou determinar soluções ótimas.

Para problemas envolvendo variáveis aleatórias com distribuições de probabilidade conhecidas (ou assumidas), a simulação de Monte Carlo é uma boa alternativa. Ela envolve a repetição do processo de simulação usando, em cada simulação, uma amostra particular de valores das variáveis aleatórias geradas de acordo com as distribuições de probabilidade correspondentes.

Repetindo o processo, uma amostra de soluções, cada qual correspondendo a um diferente conjunto de valores das variáveis aleatórias, é obtida. Uma amostra qualquer de uma simulação de Monte Carlo assemelha-se a uma amostra de observações experimentais. Porém, os resultados obtidos neste tipo de simulação devem ser tratados estatisticamente.

A geração de números aleatórios das distribuições probabilísticas prescritas é uma das principais tarefas da simulação de Monte Carlo e, para um dado conjunto de números aleatórios gerados, o processo de simulação é considerado determinístico. As simulações de Monte Carlo, na prática, são limitadas por fatores econômicos e capacidade computacional.

2.5.1.1 – Geração de números aleatórios

A geração de valores apropriados para as variáveis aleatórias, de acordo com as respectivas distribuições de probabilidade, é uma tarefa chave na aplicação da simulação de Monte Carlo. Porém, para variáveis aleatórias simples, alguns artifícios especiais podem ser utilizados como, por exemplo, lançar uma moeda para variáveis aleatórias com dois valores igualmente prováveis.

A geração automática dos números aleatórios requeridos pode ser feita sistematicamente para cada variável gerando, inicialmente u , número aleatório uniformemente distribuído

entre 0 e 1.0 e, através de transformações adequadas, obter o número aleatório correspondente com a distribuição de probabilidade especificada.

Supondo uma variável aleatória X e sua função acumulada de probabilidade $F_X(x)$, em uma dada probabilidade cumulativa $F_X(x) = u$, o valor de X é dado por:

$$x = F_X^{-1}(u) \quad (2.10)$$

Supondo agora que u seja um valor da variável uniforme padrão, U, com função de distribuição e probabilidade entre 0 e 1.0; então:

$$F_U(u) = u \quad (2.11)$$

Isto é, a probabilidade acumulada de $U \leq u$ é igual a u.

Portanto, se u é um valor de U, o valor correspondente da variável X obtida através da equação 2.10 vai ter uma probabilidade acumulada de:

$$\begin{aligned} P(X \leq x) &= P[F_X^{-1}(U) \leq x] = P[U \leq F_X(x)] \\ &= F_U[F_X(x)] = F_X(x) \end{aligned}$$

Isto significa que se (u_1, u_2, \dots, u_n) é um conjunto de valores de U, o conjunto de valores correspondentes obtidos através da equação 2.10, é representado abaixo:

$$x_i = F_X^{-1}(u_i); \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2.12)$$

e terá a função acumulada de probabilidade $F_X(x)$.

2.5.1.2 – Avaliação da probabilidade de falha

A probabilidade de falha pode ser obtida por:

$$P_f = \int_{D_f} f_x(x) dx \quad (2.13)$$

onde $f_x(x)$ é a função conjunta de densidade de probabilidade e D_f é o domínio da região de falha. O Método de Monte Carlo pode ser aplicado nesta equação ao definir uma função indicadora como:

$$I(x) = \begin{cases} 1, & g(x) \leq 0 \\ 0, & g(x) > 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

sendo $g(x)$ uma função do estado limite que separa o espaço amostral em duas regiões. A primeira de segurança (D_s) e a outra de falha (D_f). Ter $g(x) > 0$ corresponde a um ponto da região de segurança e $g(x) \leq 0$ a um ponto da região de falha. Deste modo:

$$P_f = \int_{\text{todo } X} I(x) f_x(x) dx = E\{I(x)\} \quad (2.15)$$

onde $\{E\{I(x)\}$ é o operador do valor esperado.

O Método de Monte Carlo fornece um estimador \hat{P}_f a partir de n_{si} simulações do vetor de parâmetros de projeto, com os quais se obtém resultados da função indicadora, $I_i = I(x_i)$.

Para cada uma destas amostras, a função $g(x)$ é avaliada e, se $g(x) \leq 0$, uma falha é contada. Logo, uma aproximação para a probabilidade de falha é dada pelo número total de falhas dividido pelo número total de simulações, através da equação 2.16:

$$\hat{P} = \frac{1}{n_{si}} \sum_{i=1}^{n_{si}} I_i \quad (2.16)$$

sendo n_{si} o correspondente número de simulações.

Do mesmo modo, o coeficiente de variação de P_f pode ser estimado através de:

$$\hat{\delta}_{P_f} = \frac{1}{n_{si} \hat{P}_f} \sqrt{n_{si} (\hat{P}_f - \hat{P}_f^2)} \quad (2.17)$$

Deste modo, a simulação de Monte Carlo consiste, de maneira geral, em:

- Gerar n_{si} amostras das variáveis aleatórias a partir da função conjunta de densidade de probabilidade;
- Verificar a ocorrência de falha ou não para cada amostra, através de $I(x)$;
- Estimar a probabilidade de falha através da equação 2.16;
- Verificar o erro estatístico de P_f através da equação 2.17.

2.5.2 – Método do segundo momento de primeira ordem (FORM)

No método FORM ('First Order Reliability Method'), as variáveis aleatórias U de distribuições quaisquer, que podem ser ou não dependentes entre si, são transformadas em variáveis normais padrão estatisticamente independentes V .

A função de falha $G(U)$ é descrita como $g(V)$ em função das variáveis V . Desta forma, a superfície de falha $g(V) = 0,0$ é aproximada por uma superfície linear ou hiperplano. O ponto desta superfície com menor distância até a origem (V^*) é o ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas (Sagrilo, 1996).

A probabilidade de falha pode ser calculada como:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.18)$$

onde β , chamado de índice de confiabilidade, é a distância do ponto V^* até a origem e calculado como (figura 2.4):

$$\beta = |V^*| \quad (2.19)$$

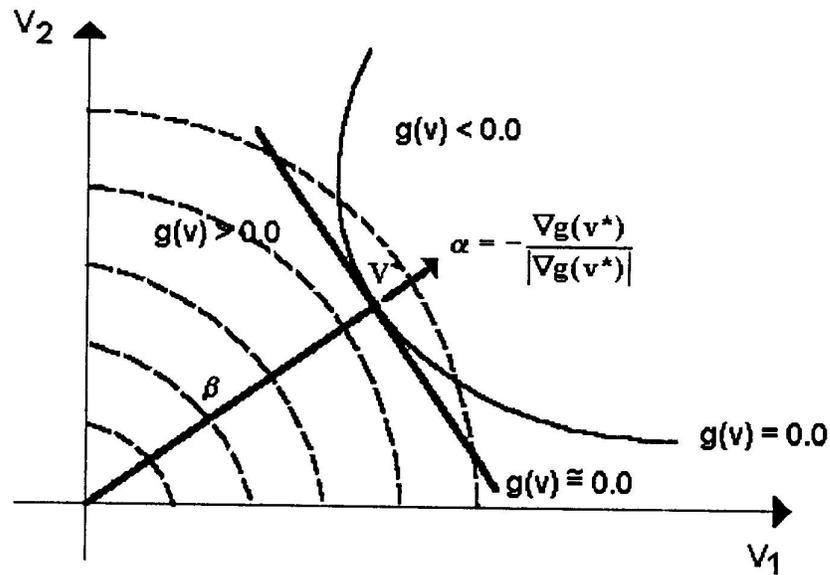


Figura 2.4: Representação gráfica do método FORM

Tem-se que:

$$V^* = -\alpha^* \beta \quad (2.20)$$

$$g(V) = \beta + \sum_{i=1}^n \alpha_i V_i \quad (2.21)$$

sendo α^* o vetor normal à superfície de falha no ponto de projeto.

É importante salientar que o método FORM calcula a probabilidade de falha de maneira aproximada, que depende da forma da função no espaço das variáveis reduzidas.

O método FORM tem como principais desafios a busca ao ponto de projeto V^* e a transformação das variáveis em variáveis normais padrão. Esta transformação pode ser feita utilizando as distribuições normais equivalentes. A obtenção do ponto de projeto pode ser feita através da solução de um problema de otimização.

2.5.2.1 – Transformação de variáveis

A transformação das variáveis aleatórias U em variáveis V normais padrão e estatisticamente independentes pode ser feita de várias maneiras. Em confiabilidade estrutural, a mais utilizada baseia-se na transformação de variáveis normais correlacionadas em variáveis normais estatisticamente independentes e é conhecida como transformação de Nataf [Kiureghian and Liu, 1986].

No caso de U conter somente variáveis normais e estas forem correlacionadas entre si (ou não), pode-se obter um conjunto de variáveis normais padrão, que sejam estatisticamente independentes, através da seguinte transformação:

$$V = \Gamma \sigma^{-1}(U - m) \quad (2.22)$$

Sendo m o vetor das médias das variáveis U ; σ uma matriz diagonal contendo os desvios padrão das variáveis U e $\Gamma = L^{-1}$, com L sendo a matriz triangular inferior obtida através da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação U .

Esta matriz é dada por:

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 & 0 & 0 \\ L_{12} & L_{22} & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ L_{1n} & L_{2n} & \cdot & L_{nn} \end{bmatrix}$$

sendo n o número de variáveis aleatórias envolvidas na transformação. Os termos L_{ij} são definidos como:

$$\begin{aligned} L_{11} &= 1,0 \\ L_{i1} &= \rho_{ij} \quad i = 1, n \\ L_{ik} &= \frac{1}{L_{kk}} \left[\rho_{ik} - \sum_{j=1}^{k-1} L_{ij} L_{kj} \right] \quad 1 < k < i \end{aligned}$$

$$L_{ii} = \sqrt{1 - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij}^2} \quad i > 1,0$$

sendo ρ_{ij} o coeficiente de correlação entre as variáveis U_i e U_j .

Para a determinação do ponto de projeto, torna-se necessário definir o Jacobiano da transformação:

$$J = \frac{\Delta V}{\Delta U} \quad (2.23)$$

A partir da equação (2.22) tem - se que:

$$J = \Gamma \sigma^{-1} \quad (2.24)$$

Nos casos onde as variáveis não são normais, uma transformação normal equivalente deve ser aplicada para que se possa operar com a equação (2.22). Esta transformação não considera casos de variáveis não correlacionadas.

Sejam duas variáveis U_i e U_j com qualquer distribuição de probabilidade dependentes entre si pelo coeficiente de correlação ρ_{ij} . Um coeficiente de correlação equivalente entre as duas distribuições normais, equivalente às variáveis U_i e U_j é dado por:

$$\rho_{ij}^E = F \rho_{ij} \quad (2.25)$$

sendo F um valor dependente somente de ρ_{ij} e dos coeficientes de variação de U_i e U_j . Expressões analíticas para o fator F , para um grande número de distribuições de probabilidade, são dadas em Kiureghian and Liu (1986).

A expressão (2.22) pode ser usada também para se obter as variáveis normais padrão estatisticamente independentes V , a partir do momento em que foram definidas as normais equivalentes para as variáveis U e suas equivalentes correlações.

A transformação de Nataf [Kiureghian and Liu, 1986] opera com informações probabilísticas incompletas, ou seja, com uma função densidade de probabilidade $f_u(U)$

não conhecida. Já no caso de se dispor de informações probabilísticas completas ($f_u(U)$ conhecida) utiliza-se a transformação de Rosenblatt [Madsen, et al. 1986].

Na prática, poucas vezes se dispõe de dados completos, sendo este o motivo da transformação de Nataf ser a mais usada.

2.5.2.2 – Ponto de projeto

Para se encontrar o ponto V^* sobre a superfície de falha que se encontra mais próxima à origem, pode-se formular um problema de otimização P_1 com uma restrição tal que:

$$P_1: \text{Minimize } [V] \text{ Sujeito a } g(V) = 0$$

Vários algoritmos de otimização podem ser utilizados para a resolução deste problema. Entre eles, o mais utilizado na análise de confiabilidade estrutural é o de Hasofer & Lind (1974) e aperfeiçoado por Rackwitz & Fiessler (1978), também chamado de HLRF.

Low e Tang (1997) apresentaram uma alternativa do Método FORM para a análise probabilística, resultando na obtenção do índice de confiabilidade β . Neste processo, uma aproximação é feita para a superfície de ruptura ou superfície de estado limite no espaço das variáveis normais padrão não correlacionadas. Neste caso, o índice de confiabilidade β é dado pela menor distância da superfície de falha transformada até a origem das variáveis reduzidas.

Em problemas de estabilidade de taludes, admite-se que as principais incertezas estão nos parâmetros de resistência do maciço: coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ). A superfície de falha que divide as combinações de c e ϕ que vão levar o sistema à falha daquelas que não vão levar, é definida por $F_s = 1$ ou pela função de desempenho (PerFunc) = $F_s - 1 = 0$; sendo F_s o fator de segurança.

As variáveis aleatórias c e ϕ geram um espaço aleatório bi-dimensional com uma elipse de dispersão ($1 - \sigma$ ou $1 -$ desvio padrão) centrada nos valores médios das médias de c e

ϕ (m_c e m_ϕ). Assumindo distribuições normais para as variáveis aleatórias, mostra-se que o coeficiente β é dado por:

$$\beta = \min_{\mathbf{X} \in F} \sqrt{(\mathbf{X} - \mathbf{m})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{m})} \quad (2.26)$$

onde \mathbf{X} é um vetor que representa o conjunto das variáveis aleatórias; \mathbf{m} são seus valores médios; \mathbf{C} é a matriz de covariância e F a região de ruptura.

A forma quadrática $(\mathbf{X} - \mathbf{m})^T \mathbf{C}^{-1} (\mathbf{X} - \mathbf{m})$ na equação acima é a equação do elipsóide inclinado de dispersão das variáveis. Pode-se considerar o índice β de confiabilidade de Hasofer – Lind como sendo a razão que faz com que o elipsóide de dispersão $1 - \sigma$ toque a superfície de falha.

Utilizando-se ferramentas de otimização disponíveis em planilhas eletrônicas (por exemplo o “SOLVER” do software Microsoft Excel), o índice de confiabilidade β e, portanto, a probabilidade de falha, pode ser determinado.

Capítulo 3

Análises Estatísticas e de Confiabilidade de um Talude Genérico de Mineração

3.1 – Introdução

Neste capítulo serão apresentadas algumas ferramentas capazes de realizar as análises estatísticas e de confiabilidade para o caso genérico de um talude de mineração. Guedes (1997) realizou análises probabilísticas e de confiabilidade para o talude em questão. Foram utilizados os métodos de análise de confiabilidade do Segundo Momento de Primeira Ordem, Simulação de Monte Carlo e Estimativas Pontuais.

Para a análise do talude no presente trabalho, foram utilizadas diferentes metodologias:

- Método Equivalente (Guedes, 1997);
- Simulação de Monte Carlo através do software comercial SLOPE/W do pacote geotécnico GEOSLOPE versão 4.0;
- planilhas eletrônicas em ambiente Microsoft Excel utilizando a proposição de Low & Tang (1997);
- proposta de Duncan (2000).

Após a obtenção dos resultados de fator de segurança (FS), índice de confiabilidade (β), e probabilidade de ruptura (Pr) para o talude analisado através das ferramentas supracitadas uma tabela comparativa foi elaborada para visualização e correlação dos resultados.

Este capítulo é de fundamental importância nas análises estatísticas e de confiabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco, uma vez que valida ferramentas alternativas para estas análises, mediante comparações efetuadas com resultados já publicados na literatura técnica.

3.2 – Métodos de Análise

Para as análises de estabilidade de taludes em solos ou rochas, são utilizados comumente os chamados métodos de equilíbrio limite. Nesta abordagem, a massa de solo ou rocha potencialmente instável, tendendo a deslocar ao longo de uma dada superfície potencial de ruptura, é subdividida em fatias ou blocos. Ao utilizar equações capazes de satisfazer o equilíbrio estático de momentos e forças segundo duas direções ortogonais entre si, quantifica-se a estabilidade do talude mediante a determinação de um fator de segurança FS, admitido como constante ao longo da superfície potencial de ruptura considerada (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Métodos Convencionais de análise da estabilidade de taludes

Método de análise	Equilíbrio de forças		Equilíbrio de momentos	Referências
	Direção 1	Direção 2*		
Fellenius	Sim	Não	Sim	Fellenius (1936)
Bishop Simplificado	Sim	Não	Sim	Bishop (1955)
Janbu Simplificado	Sim	Sim	Não	Janbu (1954, 1973)
Janbu Generalizado	Sim	Sim	**	Janbu (1973)
Spencer	Sim	Sim	Sim	Spencer (1967, 1973)
Morgenstern – Price	Sim	Sim	Sim	Morgenstern e Price (1965)
GLE***	Sim	Sim	Sim	Fredlund e Krahn (1977) Fredlund et al (1981)
Sarma	Sim	Sim	Sim	Sarma (1973, 1979)
* Qualquer uma de duas direções ortogonais (por ex.: vertical e horizontal) pode ser utilizada no somatório das forças ** Equilíbrio de momentos utilizado no cálculo das forças cisalhantes entre fatias *** Método Geral de Equilíbrio Limite				

Os métodos de equilíbrio limite comumente adotados na prática da Engenharia Geotécnica utilizam-se da divisão da massa de solo potencialmente instável em fatias verticais. De uma maneira geral, estes métodos podem ser divididos em dois grandes grupos, dependendo se as premissas adotadas nos métodos satisfazem ou não todos os requisitos de equilíbrio global e também para cada fatia individualmente:

- Não rigorosos: métodos que não satisfazem integralmente as premissas de equilíbrio estático global ou para as fatias individuais (tabela 3.2);
- Rigorosos: métodos que satisfazem integralmente estas condições de equilíbrio e, assim, teoricamente fornecem resultados mais confiáveis (Tabela 3.3).

Tabela 3.2 – Características de alguns métodos de equilíbrio limite não rigorosos
(de Campos, 1985)

Métodos Não - Rigorosos		
Método	Hipóteses Adotadas	Sup. de ruptura/ comentários
Fellenius	Desconsidera forças entre fatias.	Circular
Bishop Simplificado	A resultante das forças entre fatias é horizontal, ou seja, as forças cisalhantes entre as fatias é nula.	Circular – n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre a magnitude das forças cisalhantes entre fatias (uma hipótese em excesso). FS é determinado a partir de equilíbrio de momentos.
Janbu Simplificado	A resultante das forças entre fatias é horizontal. Um fator de correção empírico é usado para levar em conta as forças cisalhantes entre fatias.	Qualquer – Valores de FS sugeridos para condições de solos homogêneos. FS é determinado a partir de equilíbrio de forças.
Janbu Generalizado	Localização da força normal entre fatias definida por uma linha de empuxo arbitrária.	Qualquer – n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre o ponto de aplicação das forças normais entre fatias (uma hipótese em excesso). O equilíbrio de momentos da última fatia não é satisfeito já que a posição da última força normal não é utilizada. FS é determinado a partir de equilíbrio de momentos.

Tabela 3.3 – Características de alguns métodos de equilíbrio limite rigorosos
(de Campos, 1985)

Métodos rigorosos		
Método	Hipóteses Adotadas	Sup. de ruptura/ comentários
Spencer	A resultante das forças entre fatias tem inclinação constante através da massa de solo.	Circular ou qualquer. Método igual ao de Morgenstern – Price com $f(x)=1$
Morgenstern – Price	A direção da resultante das forças entre fatias é definida usando uma função arbitrária $f(x)$. A porcentagem da função, λ , requerida para satisfazer o equilíbrio de forças e momento é calculada.	Qualquer – n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre o relacionamento relativo entre a magnitude das forças entre fatias. Incógnita λ introduzida. Fatias de espessura finita no GLE e infinitesimais no Morgenstern – Price.
GLE		
Sarma (1973)	A resistência interna entre fatias é mobilizada. A distribuição da resultante das forças cisalhantes entre fatias é definida usando uma função arbitrária. A % da função requerida para satisfazer o equilíbrio estático é calculada.	Qualquer – n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal e (n-1) sobre a magnitude relativa das forças cisalhantes entre fatias. Incógnita λ introduzida.
Sarma (1979)	A resistência ao cisalhamento é mobilizada nos lados de todas as cunhas. Utiliza cunhas em vez de fatias com inclinação variada das interfaces para reproduzir condições críticas.	Qualquer – (n-1) hipóteses sobre o relacionamento relativo entre as forças entre cunhas e (n-1) hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal ou da força cisalhante entre cunhas. Solução na forma de um fator de aceleração crítico.

Para a análise dos taludes em questão, foram adotados os métodos de Bishop Simplificado (por ser geralmente aplicado na prática da Engenharia Geotécnica) e Spencer (por ser adotado comumente pela CVRD nas análises de estabilidade de taludes de minas). As tabelas 3.4 e 3.5 fornecem elementos de correlação para os métodos de Bishop Simplificado e Spencer, respectivamente, em termos de equações disponíveis e incógnitas (Wright, 1969).

Tabela 3.4 – Correlações equações x incógnitas para o método de Bishop Simplificado

-
- Equações:
 - 1 - Equação geral de equilíbrio de momentos
 - n - Equações de equilíbrio de forças para as fatias individuais
 -
 - n + 1 - Total de equações

 - Incógnitas:
 - 1 - Fator de segurança (FS)
 - n - Forças normais atuantes na base de cada fatia
 -
 - n + 1 - Total de incógnitas

Tabela 3.5 – Correlações equações x incógnitas para o método de Spencer

- Equações:
 - 1 - Equação geral de equilíbrio de momentos
 - n - Equações de equilíbrio de forças verticais para as fatias individuais
 - n - Equações de equilíbrio de forças horizontais para as fatias individuais
 - n - 1 - Equações de equilíbrio de momentos para as fatias individuais
 -
 - 3 n - Total de equações

 - Incógnitas:
 - 1 - Fator de segurança (FS)
 - 1 - Inclinação das forças laterais (θ)
 - n - Forças normais nas bases de cada fatia (N)
 - n - 1 - Magnitude da resultante das forças entre fatias (Z)
 - n - 1 - Locações das forças entre fatias (Y_i)
 -
 - 3 n - Total de incógnitas
-

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia de computadores e programação, softwares específicos foram implementados para análises da estabilidade de taludes, facilitando sobremaneira as operações de cálculo e estimativa do chamado fator de segurança (FS) do talude investigado. No presente estudo utilizou-se o software SLOPE/W, versão 4.0 do pacote geotécnico GEOSLOPE, para proceder as análises de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco.

3.3 – Apresentação do estudo de caso

O caso analisado consistiu de um talude hipotético com 200m de altura, inclinação de 34° e nível d'água localizado 80m abaixo da superfície superior do talude, conforme mostrado na Figura 3.1. (Sandroni e Sayão, 1992).

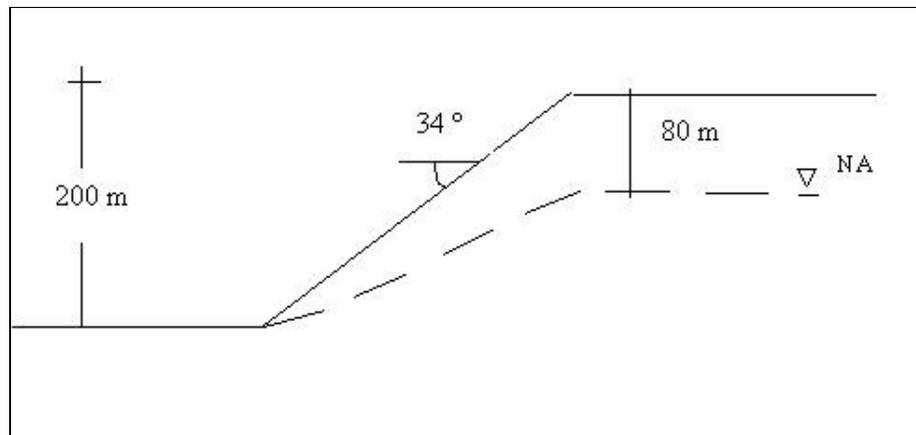


Figura 3.1: Configuração do talude de mineração analisado

Os valores das médias e variâncias obtidos para os parâmetros do solo, considerados como as variáveis aleatórias do problema, estão apresentados na tabela 3.6.

Tabela 3.6: Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias

<i>Parâmetro [Xi]</i>	<i>E [Xi]</i>	<i>V [Xi]</i>	<i>σ [Xi]</i>
γ nat (KN/m³)	28,3	1,96	1,40
γ sat (KN/m³)	29,0	1,96	1,40
c' (Kpa)	25,0	590,0	24,3
Tan (Φ')	0,781	0,0072	0,0848
Piezometria (m)	120,0	400,0	20,0

Os valores de média ($E[x]$) e variância ($V[x]$) para os parâmetros de resistência e pesos específicos foram obtidos por Sandroni e Sayão (1992) de acordo com Guedes (1997), com base em resultados de 50 ensaios de cisalhamento direto. No caso da piezometria, utilizou-se um grande número de informações piezométricas (cerca de 100 piezômetros) ao longo do trecho objeto do estudo.

3.4 – Análises determinísticas do talude de mineração

As análises determinísticas do talude em questão foram realizadas, no presente trabalho, através do software SLOPE/W e na formulação de uma planilha eletrônica no EXCEL, utilizando o método de Janbu Generalizado. Guedes (1997) realizou estas análises de estabilidade através do programa STABL5M (Purdue University, E.U.A.) utilizando o método de Bishop Simplificado.

3.4.1 – Análise de estabilidade de taludes usando o método das fatias de Janbu Generalizado através do software Microsoft EXCEL

A planilha eletrônica foi desenvolvida com base na proposição de Low & Tang (1997), utilizando o método de Janbu Generalizado. Neste processo, as equações de equilíbrio das fatias individualizadas são resolvidas automaticamente pela planilha.

Os fatores que tornam esta ferramenta de uso fácil e prático são a simplicidade conceitual, a facilidade de implementação e a versatilidade prática dos métodos e perspectivas propostas. Além disso, destaca-se o fato de não haver necessidade de programação, a não ser simples implementações e uso de técnicas em planilhas práticas.

Este método apresenta uma maneira de resolver as equações de equilíbrio limite das fatias através do uso de iterações circulares e ferramentas de otimização pré-existentes. Desta maneira, a planilha é capaz de calcular o fator de segurança associado a uma superfície de ruptura qualquer no talude em estudo.

Um exemplo típico de análise de estabilidade implementado com a planilha eletrônica é mostrado a seguir (Tabela 3.7), incluindo os dados de entrada (apresentados na parte superior da planilha).

Os dados de entrada são expressos pelos seguintes parâmetros:

- Fatia: número de fatias consideradas na análise;
- $\tan \alpha$: tangente do ângulo que a base da fatia faz com a horizontal;
- ΔX : largura da fatia;
- P: pesos das fatias, dado pelo produto do peso específico do solo pela altura média da fatia ($\gamma * h_m$);
- U: valores de poropressão; altura da linha freática com relação ao ponto médio da base da fatia (m);
- C: valores de coesão do solo (expressos em tf/m^2);
- $\tan \Phi$: tangente do ângulo de atrito do solo;
- h_i : 1/3 da altura das interfaces entre as fatias;
- $\tan \alpha_i$: tangente do ângulo formado pela reta que une um ponto situado a um terço da altura da interface entre as fatias superiores do talude, a partir da base desta interface, até o ponto correspondente na interface entre as fatias situadas imediatamente abaixo das primeiras (Fig. 3.2).

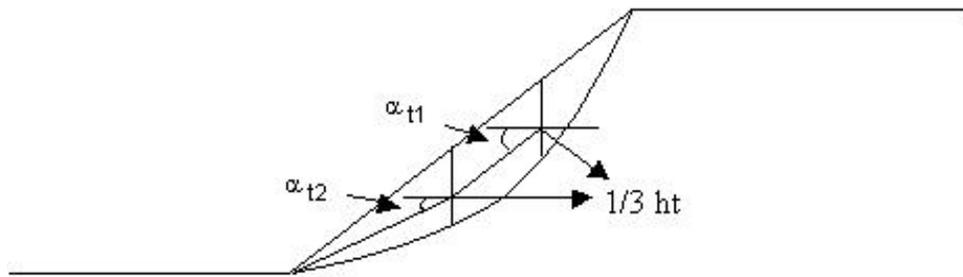


Figura 3.2: Localização do ângulo α_t na configuração do talude

A computação dos dados e o arranjo dos cálculos são apresentados na parte inferior da planilha, incluindo o valor obtido do Fator de Segurança FS pelo método de análise de estabilidade de Janbu Generalizado.

Cálculo determinístico do FS de taludes usando o método de Janbu - Talude H = 200m; inclinação 34°

<i>Fatia</i>	<i>Tan α</i>	<i>Δ X</i>	<i>ρ</i>	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>Tan φ</i>	<i>Δ Q</i>	<i>h_z</i> 0	<i>Tan α_z</i>				
1	1,668	29,529	49,422	0	2,5	0,781	0	9,777	1,051				
2	1,219	29,529	112,946	0	2,5	0,781	0	15,223	0,838				
3	0,952	29,529	147,699	0	2,5	0,781	0	18,047	0,733				
4	0,762	29,529	163,087	4,06	2,5	0,781	0	18,923	0,626				
5	0,613	29,529	163,941	12,726	2,5	0,781	0	18,533	0,545				
6	0,489	29,529	153,51	17,15	2,5	0,781	0	16,697	0,483				
7	0,381	29,529	133,445	18,41	2,5	0,781	0	13,99	0,405				
8	0,283	29,529	104,836	16,25	2,5	0,781	0	10,107	0,354				
9	0,193	29,529	68,397	11,28	2,5	0,781	0	5,417	0,315				
10	0,106	29,529	24,596	4,06	2,5	0,781	0	0	-				
						<i>E</i>		<i>T</i>					
<i>Fatia</i>	<i>B</i>	<i>A'</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>Δ E</i>	0	<i>ΔE/ΔX</i>	0	<i>ΔT</i>	<i>t</i>		<i>r</i>	<i>σ'</i>
1	2434,250	1213,600	0,553	2194,849	595,573	595,573	26,379	0,000	0,000	0,000		16,463	21,962
2	4065,587	2678,600	0,723	3704,438	962,293	1557,866	28,613	0,000	0,000	0,000		42,275	61,413
3	4152,056	3480,079	0,851	4087,906	727,522	2285,388	18,478	0,000	0,000	0,000		60,836	89,783
4	3669,637	3741,327	0,948	3946,292	363,736	2649,124	6,805	0,000	0,000	0,000		70,828	105,056
5	2967,541	3561,165	1,018	3496,875	38,127	2687,251	-4,681	0,000	0,000	0,000		72,109	107,012
6	2216,635	3218,577	1,065	3021,519	-314,562	2372,689	-15,360	0,000	0,000	0,000		69,177	102,532
7	1501,330	2726,777	1,091	2499,531	-592,586	1780,103	-22,564	0,000	0,000	0,000		61,922	91,443
8	876,084	2116,806	1,097	1929,146	-740,007	1040,097	-24,102	0,000	0,000	0,000		50,671	74,246
9	389,801	1391,063	1,086	1281,110	-683,415	356,682	-17,611	0,000	0,000	0,000		35,039	50,354
10	76,987	547,427	1,057	517,676	-356,682	0	-12,079	0	0,000	0,000		14,523	18,997
	22349,908			26679,341									

Tabela 3.2: Cálculo do fator de segurança para o talude de mineração analisado; FS = 1,194

3.4.2 – Análise de estabilidade de taludes usando o software SLOPE/W

Uma primeira correlação dos dados foi feita com resultados obtidos através do software SLOPE/W, pelo método de Janbu Modificado. Como, neste caso, não são consideradas as componentes verticais das forças entre as fatias, estas componentes foram zeradas na coluna específica da planilha eletrônica.

Os valores utilizados como dados de entrada na planilha foram obtidos após a análise do problema no software SLOPE/W. A superfície de ruptura considerada para a análise da planilha é aquela encontrada pelo SLOPE/W como sendo a superfície de ruptura crítica pelo método de Janbu Modificado.

O programa SLOPE/W faz parte do pacote geotécnico GEOSLOPE, que tem por objetivo análises de estabilidade de taludes e obras sujeitas às mais diversas condições. Na versão 4.0, utilizada para analisar o talude em questão, também é possível realizar análises probabilísticas através do método da Simulação de Monte Carlo. Este tipo de análise será tratado posteriormente.

Os parâmetros utilizados pelo programa para analisar o problema são definidos, no caso, por seus valores médios. Isto ocorre porque ainda não será feita nenhuma análise de confiabilidade no talude. Assim, os valores utilizados para os parâmetros c , $\tan \phi$, γ_{nat} , γ_{sat} correspondem às médias apresentadas na tabela 3.6 e as análises são, então, aplicadas ao talude padrão.

Para efeitos de comparação com a planilha EXCEL descrita no item anterior, a Figura 3.3 mostra a geometria do problema (número de fatias, superfície de ruptura analisada, fator de segurança, etc.) após a análise de estabilidade através do método de Janbu Modificado no software SLOPE/W. Foram realizadas complementarmente análises determinísticas dos taludes utilizando também os métodos de Bishop Modificado, Janbu Modificado, Fellenius e Spencer, mostrando a variação dos valores de FS com os diferentes métodos (Figura 3.4).

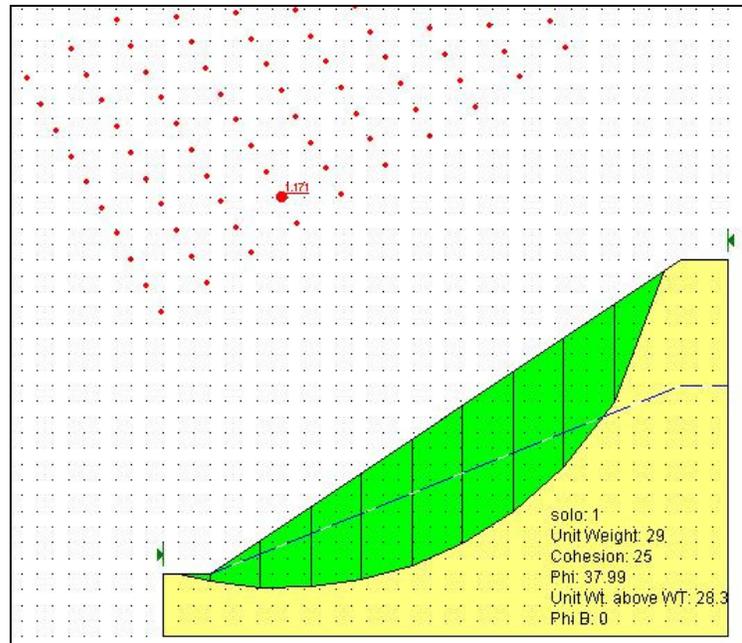


Figura 3.3: Resultados do programa SLOPE/W para a análise do talude genérico (Janbu Modificado)

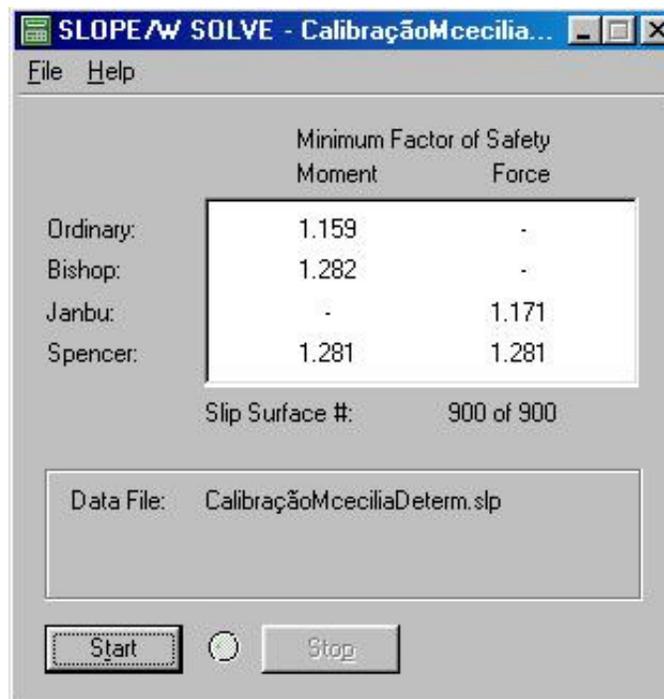


Figura 3.4: Resultados das análises de estabilidade para o talude genérico pelo programa SLOPE/W

A visualização dos correspondentes diagramas de forças para cada fatia individualizada pode também ser obtida diretamente a partir do programa (Figura 3.5). Adicionalmente, são obtidos os valores de poropressões e os parâmetros característicos da geometria da fatia.

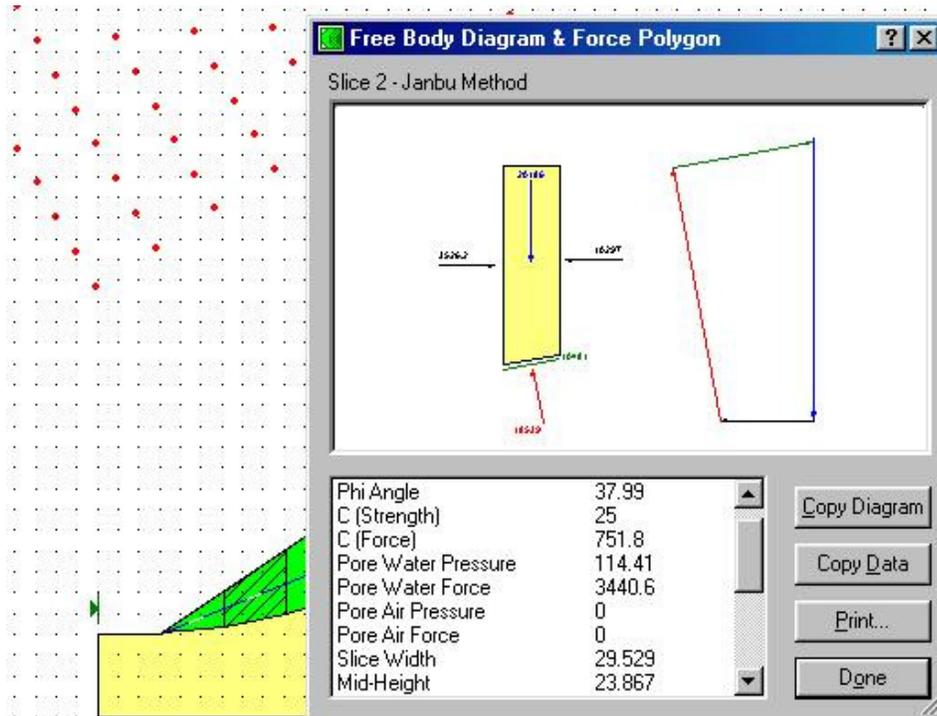


Figura 3.5: Distribuição de forças atuantes numa fatia genérica

3.5 – Análise Probabilística do talude de mineração

Para realizar este tipo de análise no talude de mineração considerado foram utilizadas quatro ferramentas distintas: método equivalente (Guedes, 1997), extensão da planilha em EXCEL mostrada no item 3.4.1 implementada de acordo com Low & Tang (1997), metodologia proposta por Duncan (2000) e, por fim, os dados utilizados para a análise determinística no software SLOPE/W serão reanalisados, juntamente com os dados de média e desvio padrão das variáveis aleatórias mostrados na tabela 3.6, para realizar a análise probabilística através de simulação de Monte Carlo neste mesmo software.

3.5.1 – Análise probabilística de taludes usando o Método Equivalente (Método FOSM Simplificado)

Com base nos valores estabelecidos pelas análises de estabilidade determinísticas para o talude de mineração considerado, será feita uma análise de confiabilidade através de um método equivalente ao método do Segundo Momento de Primeira Ordem. Este método é dito equivalente já que utiliza o método das diferenças divididas (ascendentes e descendentes) para aproximar, matematicamente, os valores das derivadas parciais presentes na formulação da variância do fator de segurança (Guedes, 1997).

O método consiste em expandir, numa série de Taylor, a função $FS = FS(X_1, X_2, \dots, X_n)$ com o vetor X representando os parâmetros do solo considerados como variáveis aleatórias. Assim sendo, seguem as relações para $E[FS]$ (Fator de segurança médio) e $V[FS]$ (variância do Fator de Segurança):

$$E(FS) = \overline{FS} = f(\overline{X_1}; \overline{X_2}; \dots; \overline{X_n}) \quad (3.1)$$

$$V(FS) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial FS_i}{\partial X_i} \right)^2 * V(X_i) \quad (3.2)$$

onde:

∂FS_i : Variação do fator de segurança com a variação de ∂X_i para cada um dos parâmetros e $V[X_i]$: Variância de X_i .

A aproximação das derivadas parciais dos parâmetros é feita através da razão entre a variação da função de FS e a variação para cada parâmetro, de acordo com a equação:

$$\frac{\partial FS}{\partial X_i} = \frac{FS(\overline{X_i} + \partial X_i) - FS(\overline{X_i})}{\partial X_i} \quad (3.3)$$

Para que a razão $\partial FS / \partial X_i$ seja considerada uma constante (independente de ∂X_i), os parâmetros devem apresentar uma variação suficientemente pequena. De acordo com

Dell'Avanzi (1995) esta condição é satisfeita para variações dos parâmetros em torno de 10%.

Os parágrafos a seguir apresentam o procedimento de cálculo das análises probabilísticas dos taludes utilizando o Método Equivalente.

O valor da variância do fator de segurança é dado pela equação 3.2. Os valores de ∂FS_i são obtidos ao avaliar os fatores de segurança para o problema variando um dos parâmetros de ∂X_i e mantendo-se os demais parâmetros fixos e isto se repete para cada um dos n parâmetros.

As variâncias de cada um dos parâmetros foram obtidas através de análises de resultados de ensaios em amostras representativas do talude de acordo com Guedes (1997). Estes valores encontram-se listados na tabela 3.6.

A tabela 3.8 mostra detalhadamente o cálculo da variância do fator de segurança para o exemplo analisado. Para proceder ao cálculo dos fatores de segurança médio e aqueles correspondentes à variação dos parâmetros, foi utilizado o método de Janbu Modificado através do SLOPE/W.

O valor médio do Fator de Segurança encontrado foi $E[FS] = 1,171$. A última coluna evidencia a porcentagem de cada parcela de variância com relação à variância total.

Tabela 3.8: Cálculo de $V[FS]$ através do Método Equivalente ao Segundo Momento de Primeira Ordem

$$E[FS] = 1,171$$

Parâmetro	X_i	δX_i	$\delta X_i + X_i$	FS	δFS_i	$\delta FS_i / \delta X_i$	$V[X_i]$	$(\delta FS_i / \delta X_i)^2 * V[X_i]$	% de $V[FS]$
γ_{nat}	28,3	2,83	31,13	1,164	-0,007	-0,00247	1,96	1,199E-05	0,06
γ_{sat}	29	2,9	31,9	1,193	0,022	0,007586	1,96	1,128E-04	0,53
C	25	2,5	27,5	1,175	0,004	0,0016	590	1,510E-03	7,09
Tg ϕ	0,781	0,113	0,894	1,328	0,157	1,389381	0,0072	1,390E-02	65,22
Piezometria	120	10	130	1,133	-0,038	-0,0038	400	5,776E-03	27,10

$$V[FS] = 0,0213$$

Para o exemplo em análise temos (sendo $\sigma[FS]$ o desvio padrão do fator de segurança):

$$\sigma[FS] = \sqrt{V[FS]} = \sqrt{(0,0213)} = 0,1459$$

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]} = \frac{1,171 - 1}{0,1459} = 1,172$$

onde β é o índice de confiabilidade. Este valor de β é equivalente a uma probabilidade de ruptura de 12,10%, de acordo com uma distribuição normal de FS.

A figura 3.6 mostra a contribuição de cada parâmetro para a variância do fator de segurança. O parâmetro com maior influência neste aspecto é o ângulo de atrito com 65% de $V[FS]$ seguido pela piezometria com 27% e a coesão com 7% deste valor. Os pesos específicos natural e saturado não apresentam influência significativa no valor total da variância do fator de segurança.

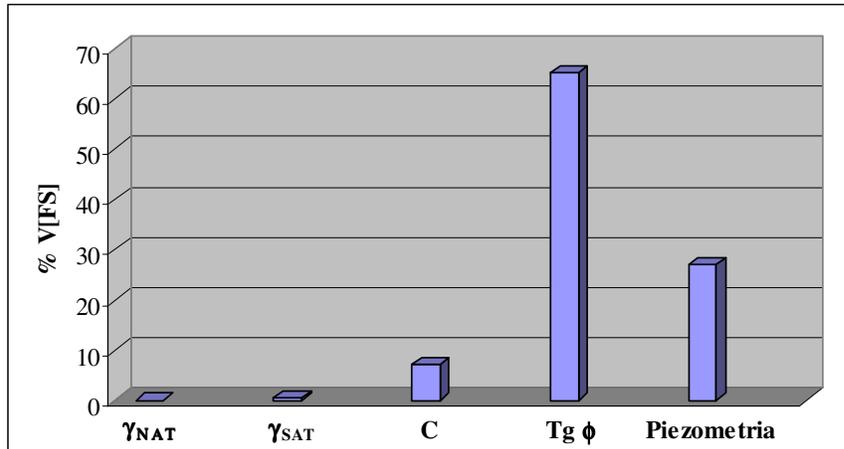


Figura 3.6: Influência de cada parâmetro na V[FS]

O valor de β é função da variabilidade dos parâmetros geotécnicos (γ , c , ϕ e piezometria), do tipo de distribuição do FS, além da geometria do problema e das solicitações externas. No exemplo em questão, β está relacionado apenas aos parâmetros considerados variáveis aleatórias (γ , c , ϕ e piezometria), sendo considerados constantes os outros parâmetros (geometria e solicitações externas).

3.5.2 – Análise probabilística de taludes usando o método das fatias de Janbu Generalizado através do software Microsoft EXCEL

Assim como na análise descrita no item 3.4.1, utilizou-se o software Microsoft EXCEL também para a análise probabilística.

A planilha desenvolvida para a análise probabilística tem como objetivo a determinação do índice de confiabilidade (β) por um procedimento equivalente ao Método FORM, de acordo com a metodologia proposta por Low & Tang (1997), no qual as variáveis aleatórias correlacionadas formam um elipsóide inclinado centrado nos valores das médias destas variáveis no espaço original.

A função de performance ou superfície de falha é representada no espaço das variáveis c e ϕ por uma reta que divide as combinações de (c , ϕ) (variáveis aleatórias que

apresentam as principais incertezas no solo) que levariam e que não levariam o sistema à ruptura. O índice de confiabilidade β é representado pela menor distância desde a superfície de ruptura transformada até a origem das variáveis reduzidas.

Nesta implementação, as variáveis aleatórias foram consideradas tendo distribuições normais de probabilidade. Desta maneira, para variáveis normalmente distribuídas, minimizar β equivale a maximizar o valor da função de densidade de probabilidade das variáveis e encontrar o menor elipsóide tangente à superfície de falha.

Implementou-se, então, a partir da planilha determinística, um domínio adicional composto por duas linhas com as variáveis aleatórias (c e ϕ) e três colunas contendo os valores da média, desvio padrão e os valores de cada iteração para cada variável. Estes valores tendem a variar durante o processo de otimização ('solver') até ser obtida a convergência de β .

As colunas de " c " e " $\tan\phi$ ", que antes eram formadas por dados de entrada na planilha determinística, agora são função dos " x valores" mencionados anteriormente. Uma matriz de correlação contendo os coeficientes de correlação entre as variáveis também é adicionada à planilha. Em conjugado, instalou-se um vetor coluna que apresenta os valores de " x valores" menos a média dividido pelo desvio padrão para cada uma das variáveis aleatórias. Para facilitar o cálculo foi também inserida uma matriz transposta deste vetor coluna.

Assim como na planilha determinística, a coluna que representa os valores de " T " (componentes verticais das forças entre as fatias) foi zerada, de modo a permitir a correlação direta com os resultados do programa SLOPE/W pelo método de Janbu Modificado.

O valor do índice de confiabilidade (β), para o exemplo do talude genérico, utilizando para os valores da média e do desvio padrão das variáveis aleatórias c e ϕ valores equivalentes aos da tabela 3.6, está mostrado na Tabela 3.9.

3.5.3 – Análise probabilística de taludes usando o método de Duncan (2000)

A proposição de Duncan (2000) é baseada no fato de que as análises de confiabilidade podem ser aplicadas a problemas práticos que dispõem dos dados necessários para análises determinísticas. Estas análises de confiabilidade geram resultados em termos probabilísticos, porém muito úteis na avaliação do problema.

O procedimento proposto por Duncan (2000) é composto pelas seguintes etapas:

1. Calcula-se o fator de segurança determinístico do problema utilizando os valores médios das variáveis aleatórias consideradas na análise (F_{ss}). Esta etapa pode ser feita no SLOPE/W de acordo com o item 3.4.2, tendo como resultado para o problema estudado neste capítulo os valores expressos na figura 3.4. A partir dos valores de F_{ss} encontrados pelos métodos de Bishop Modificado (1,282), de Janbu Modificado (1,171) e de Spencer (1,281), será feita uma análise de confiabilidade para cada um deles;

Cálculo do índice de confiabilidade β de taludes usando o método de Janbu: Talude $H=200m$; inclinação 34°

Fatia	Tan α	ΔX	p	u	c	Tan ϕ	ΔQ	h_t 0	Tan α_t	
1	1,668	29,529	49,422	0	1,55	0,662	0	9,777	1,051	
2	1,219	29,529	112,946	0	1,55	0,662	0	15,223	0,838	
3	0,952	29,529	147,699	0	1,55	0,662	0	18,047	0,733	
4	0,762	29,529	163,087	4,06	1,55	0,662	0	18,923	0,626	FS 1,000
5	0,613	29,529	163,941	12,726	1,55	0,662	0	18,533	0,545	
6	0,489	29,529	153,51	17,15	1,55	0,662	0	16,697	0,483	
7	0,381	29,529	133,445	18,41	1,55	0,662	0	13,99	0,405	
8	0,283	29,529	104,836	16,25	1,55	0,662	0	10,107	0,354	
9	0,193	29,529	68,397	11,28	1,55	0,662	0	5,417	0,315	
10	0,106	29,529	24,596	4,06	1,55	0,662	0	0	-	

Fatia	B	A'	n	A	ΔE	E 0	$\Delta E/\Delta X$	T 0	ΔT	t	τ	σ'
1	2434,25	1012,17	0,56	1819,10	615,15	615,15	26,75	0,00	0,00	0,00	16,288	22,254
2	4065,59	2254,24	0,73	3100,96	964,63	1579,78	28,56	0,00	0,00	0,00	42,243	61,452
3	4152,06	2933,76	0,86	3430,28	721,78	2301,56	18,23	0,00	0,00	0,00	60,938	89,686
4	3669,64	3155,25	0,95	3314,80	354,83	2656,39	12,02	0,00	0,00	0,00	71,019	104,910
5	2967,54	3002,51	1,02	2938,15	29,39	2685,78	1,00	0,00	0,00	0,00	72,324	106,881
6	2216,64	2712,05	1,07	2538,58	-321,94	2363,83	-10,90	0,00	0,00	0,00	69,379	102,434
7	1501,33	2295,09	1,09	2098,76	-597,43	1766,40	-20,23	0,00	0,00	0,00	62,065	91,388
8	876,08	1777,93	1,10	1617,27	-741,18	1025,22	-25,10	0,00	0,00	0,00	50,708	74,236
9	389,80	1162,63	1,09	1069,28	-679,48	345,73	-23,01	0,00	0,00	0,00	34,911	50,379
10	76,99	447,37	1,06	422,72	-345,73	0	-11,71	0	0,00	0,00	14,156	19,035
	22349,91			22349,91								

	Média	Dv.Padrão	Xvalores	BETA
c	2,500	2,3	1,552	1,245
ϕ	37,990	3,799	33,528	

	Matriz de correlação		Vetor coluna [(x-m)/ σ]	Transposta "nxv"
c	1	0	-0,412	
ϕ	0	1	-1,175	
				-0,412 -1,175

Tabela 3.9: Tabela de cálculo do índice de confiabilidade para o talude de mineração analisado; $\beta = 1,245$

2. Estima-se o valor do desvio padrão para as variáveis aleatórias envolvidas no problema. Para o talude genérico analisado, foram consideradas variáveis aleatórias os pesos específicos natural e saturado (γ_{nat} , γ_{sat}), coesão (c) e tangente do ângulo de atrito do solo ($Tan \phi$). Os valores de desvio padrão para estes parâmetros foram tomados como os valores fornecidos por Guedes (1997) e mostrados na tabela 3.6;
3. Monta-se uma tabela mostrando, para cada variável aleatória, os valores médios somados e subtraídos de uma vez o desvio padrão considerado. Para cada um destes novos valores, calcula-se um novo valor de fator de segurança (F^+ para $FS(\mu + \sigma)$ e F^- para $FS(\mu - \sigma)$) considerando as demais variáveis com seus valores médios. Calcula-se então o desvio ΔF para cada variável aleatória, sendo este dado por:

$$\Delta F = F^+ - F^- \quad (3.4)$$

4. A partir dos valores de ΔF encontrados para cada variável, encontra-se o valor do desvio padrão (σ_{FS}) e do coeficiente de variação (CV_{FS}) para o fator de segurança através das fórmulas:

$$\sigma_{FS} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_1}{2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F_n}{2}\right)^2} \quad (3.5)$$

$$CV_{FS} = \frac{\sigma_{FS}}{F_{SS}} \quad (3.6)$$

onde ΔF_n é a variação do fator de segurança para cada uma das n variáveis aleatórias e F_{SS} é o fator de segurança médio calculado anteriormente.

5. Com os valores de F_{SS} e CV_{FS} , procura-se na Tabela 3.10 a probabilidades do fator de segurança ser menor que o valor crítico estabelecido a partir de uma distribuição normal do fator de segurança, o valor que represente a probabilidade de ruptura do sistema. Assumir uma distribuição normal para o fator de segurança não implica necessariamente a utilização de distribuição normal para as variáveis aleatórias.

Tabela 3.10: Probabilidades do fator de segurança ser menor do que 1.0, baseado em uma distribuição normal do fator de segurança

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA							
Fss	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
1.05	0.9%	11.7%	21.4%	27.6%	31.7%	34.6%	36.7%
1.10	0.0%	1.2%	6.5%	12.8%	18.2%	22.4%	25.8%
1.15	0.0%	0.1%	1.5%	5.2%	9.6%	13.9%	17.6%
1.16	0.0%	0.0%	1.1%	4.2%	8.4%	12.5%	16.2%
1.18	0.0%	0.0%	0.6%	2.8%	6.4%	10.2%	13.8%
1.20	0.0%	0.0%	0.3%	1.9%	4.8%	8.2%	11.7%
1.25	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	2.3%	4.8%	7.7%
1.30	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.1%	2.7%	5.0%
1.35	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.5%	1.5%	3.2%
1.40	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.9%	2.1%
1.50	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.9%
1.60	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.4%
1.70	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%
1.80	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%
1.90	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2.00	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2.20	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2.40	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2.60	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2.80	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
3.00	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA								
Fss	16%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	80%
1.05	38.3%	40.6%	42.4%	43.7%	45.3%	46.2%	46.8%	47.6%
1.10	28.5%	32.5%	35.8%	38.1%	41.0%	42.8%	44.0%	45.5%
1.15	20.7%	25.7%	30.1%	33.2%	37.2%	39.7%	41.4%	43.5%
1.16	19.4%	24.5%	29.1%	32.3%	36.5%	39.1%	40.9%	43.2%
1.18	17.0%	22.3%	27.1%	30.6%	35.1%	38.0%	40.0%	42.4%
1.20	14.9%	20.2%	25.2%	28.9%	33.8%	36.9%	39.1%	41.7%
1.25	10.6%	15.9%	21.2%	25.2%	30.9%	34.5%	36.9%	40.1%
1.30	7.5%	12.4%	17.8%	22.1%	28.2%	32.2%	35.0%	38.6%
1.35	5.3%	9.7%	15.0%	19.4%	25.8%	30.2%	33.3%	37.3%
1.40	3.7%	7.7%	12.7%	17.0%	23.8%	28.4%	31.7%	36.0%
1.50	1.9%	4.8%	9.1%	13.3%	20.2%	25.2%	28.9%	33.8%
1.60	1.0%	3.0%	6.7%	10.6%	17.4%	22.7%	26.6%	32.0%
1.70	0.5%	2.0%	5.0%	8.5%	15.2%	20.5%	24.6%	30.3%
1.80	0.3%	1.3%	3.8%	6.9%	13.3%	18.7%	22.9%	28.9%
1.90	0.2%	0.9%	2.9%	5.7%	11.8%	17.2%	21.5%	27.7%
2.00	0.1%	0.6%	2.3%	4.8%	10.6%	15.9%	20.2%	26.6%
2.20	0.0%	0.3%	1.5%	3.5%	8.6%	13.8%	18.2%	24.8%
2.40	0.0%	0.2%	1.0%	2.6%	7.2%	12.2%	16.5%	23.3%
2.60	0.0%	0.1%	0.7%	2.0%	6.2%	10.9%	15.3%	22.1%
2.80	0.0%	0.1%	0.5%	1.6%	5.4%	9.9%	14.2%	21.1%
3.00	0.0%	0.0%	0.4%	1.3%	4.8%	9.1%	13.3%	20.2%

Aplica-se, a seguir, este procedimento para o talude genérico analisado neste capítulo para vários métodos de análise de estabilidade.

➤ **Bishop Modificado**

- 1) $F_{SS} = 1,282$ (SLOPE/W);
- 2) γ_{NAT} : $\mu = 28,3 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;
 γ_{SAT} : $\mu = 29 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;
 C : $\mu = 25 \text{ KPa}$; $\sigma = 24,3 \text{ KPa}$;
 $\text{Tan } \phi$: $\mu = 0,781$; $\sigma = 0,085$;
- 3) Tabela 3.11: Variação do Fator de Segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Bishop Modificado

Variáveis	Valores	Fatores de segurança	ΔF_n
γ_{NAT}			
$\mu + \sigma$	29,7	1,280	-0,005
$\mu - \sigma$	26,9	1,285	
γ_{SAT}			
$\mu + \sigma$	30,4	1,289	0,013
$\mu - \sigma$	27,6	1,276	
C			
$\mu + \sigma$	49,3	1,336	0,108
$\mu - \sigma$	0,7	1,228	
$\text{tan } \phi$			
$\mu + \sigma$	0,866	1,416	0,267
$\mu - \sigma$	0,696	1,149	

- 4) A partir dos valores de ΔF_n obtidos e com base nas equações 3.2 e 3.3, tem-se que:

$$\sigma_{FS} = 0,144; \text{ CV}_{FS} = 11,23\%;$$

- 5) Utilizando estes valores na Tabela 3.10, tem-se que: $P_r = 1,75\%$

Para se obter o valor do índice de confiabilidade β , utiliza-se uma tabela de distribuição de probabilidade normal padrão sendo $Pr = 1 - \Phi(\beta)$. Para o caso analisado, obtém-se que $\beta = 2,11$.

➤ **Janbu Modificado**

1) $F_{SS} = 1,171$ (SLOPE/W);

2) γ_{NAT} : $\mu = 28,3 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;

γ_{SAT} : $\mu = 29 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;

C: $\mu = 25 \text{ KPa}$; $\sigma = 24,3 \text{ KPa}$;

Tan ϕ : $\mu = 0,781$; $\sigma = 0,085$;

3) Tabela 3.12: Variação do Fator de Segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Janbu Modificado

Variáveis	Valores	Fatores de segurança	ΔF_n
γ_{NAT}			
$\mu + \sigma$	29,7	1,167	-0,008
$\mu - \sigma$	26,9	1,175	
γ_{SAT}			
$\mu + \sigma$	30,4	1,182	0,025
$\mu - \sigma$	27,6	1,157	
C			
$\mu + \sigma$	49,3	1,210	0,084
$\mu - \sigma$	0,7	1,126	
tan ϕ			
$\mu + \sigma$	0,866	1,294	0,246
$\mu - \sigma$	0,696	1,048	

4) A partir dos valores de ΔF_n obtidos e com base nas equações 3.2 e 3.3, tem-se que:

$$\sigma_{FS} = 0,131; \text{ CV}_{FS} = 11,19\%;$$

5) Utilizando estes valores na Tabela 3.10, tem-se: : $P_r = 10,5\%$ e $\beta = 1,25$.

➤ **Spencer**

- 1) $F_{SS} = 1,281$ (SLOPE/W);
- 2) γ_{NAT} : $\mu = 28,3 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;
 γ_{SAT} : $\mu = 29 \text{ kN/m}^3$; $\sigma = 1,4 \text{ kN/m}^3$;
 C: $\mu = 25 \text{ KPa}$; $\sigma = 24,3 \text{ KPa}$;
 Tan ϕ : $\mu = 0,781$; $\sigma = 0,085$;
- 3) Tabela 3.13: Variação do Fator de Segurança para o caso do talude genérico analisado pelo método de Spencer

Variáveis	Valores	Fatores de segurança	ΔF_n
γ_{NAT}			
$\mu + \sigma$	29,7	1,279	-0,005
$\mu - \sigma$	26,9	1,284	
γ_{SAT}			
$\mu + \sigma$	30,4	1,288	0,013
$\mu - \sigma$	27,6	1,275	
C			
$\mu + \sigma$	49,3	1,334	0,108
$\mu - \sigma$	0,7	1,226	
tan ϕ			
$\mu + \sigma$	0,866	1,415	0,267
$\mu - \sigma$	0,696	1,148	

- 4) A partir dos valores de ΔF_n obtidos e com base nas equações 3.2 e 3.3, tem-se que:

$$\sigma_{FS} = 0,144; CV_{FS} = 11,24\%;$$

- 5) Utilizando estes valores na Tabela 3.10, tem-se, de acordo com o método de análise de Spencer

$$P_r = 1,75\%$$

$$\beta = 2,11.$$

3.5.4 – Análise probabilística de taludes através da Simulação de Monte Carlo (software SLOPE/W)

A última ferramenta de análise probabilística adotada para o estudo da estabilidade do talude genérico de mineração tomado como exemplo neste capítulo foi a Simulação de Monte Carlo, disponível no software SLOPE/W.

Na utilização deste procedimento, é necessário escolher o procedimento determinístico de solução (métodos de equilíbrio limite), os parâmetros do problema para a modelação probabilística, a representação da variabilidade destes parâmetros de acordo com um modelo de distribuição normal através do valor médio e do desvio padrão, a estimativa dos novos parâmetros de entrada e seus fatores de segurança associados várias vezes, além da densidade de probabilidade do problema.

Inicialmente, determina-se a superfície de ruptura crítica baseada em valores médios dos parâmetros de entrada, para o método de equilíbrio limite escolhido. A partir daí, a análise probabilística é aplicada sobre a superfície de ruptura crítica considerando a variabilidade dos parâmetros de entrada. Esses parâmetros são considerados como sendo normalmente distribuídos e com valores de média e desvio padrão fornecidos pelo usuário.

Assumindo uma distribuição normal para os fatores de segurança e que estes são determinados baseados em parâmetros de entrada que são atualizados através da simulação de Monte Carlo, o software SLOPE/W determina a média e o desvio padrão dos fatores de segurança.

O número de iterações do método de Monte Carlo em determinada análise depende do número de parâmetros variáveis de entrada e da probabilidade de ruptura esperada. Quanto menor for esta probabilidade ou maior for o número de variáveis aleatórias, maior será o número de iterações recomendado.

Os parâmetros que podem ser considerados pelo programa como sendo variáveis aleatórias normalmente distribuídas são os parâmetros para os vários modelos de resistência dos materiais (inclusive γ , c e ϕ no caso do modelo de Mohr-Coulomb), condições de poro-pressão, magnitude das linhas de cargas aplicadas e coeficientes sísmicos vertical e horizontal.

A geração aleatória de valores para os parâmetros de entrada no Método de Monte Carlo aplicada a um modelo determinístico é feita, no SLOPE/W, através de uma função de geração de números aleatórios. Para assegurar que uma nova faixa de números aleatórios seja gerada ao executar o programa, a função supracitada está ligada ao tempo corrente do relógio do computador.

Para o talude genérico de mineração analisado, foram feitas as seguintes considerações:

- A geometria do talude e os métodos determinísticos de análise de estabilidade de taludes utilizados foram os mesmos do item 3.4.2;
- Foram consideradas as mesmas variáveis aleatórias adotadas por Guedes (1997) e apresentadas na tabela 3.6, juntamente com seus valores de variabilidade ($E [X_i]$, $V [X_i]$, $\sigma [X_i]$);
- Para o número de iterações utilizadas no Método de Monte Carlo foram consideradas duas situações:
 - (i) $N = 417$; número de iterações adotado em Guedes (1997) na análise do mesmo problema, considerando como variáveis aleatórias a coesão, a piezometria e o ângulo de atrito, com precisão $\epsilon = 30\%$ e um nível de confiança de $(1 - \alpha) = 90\%$. Os valores dos fatores de segurança (FS), índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (P_r), assim como o gráfico da função de distribuição de probabilidades, são apresentadas nas Figuras 3.7 a 3.9.

A figura 3.7 mostra os valores obtidos para o fator de segurança (FS), índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (P_r), além do gráfico da função de distribuição de probabilidade para a análise do talude genérico de mineração pelo método de Bishop Modificado. A figura 3.8 fornece os mesmos resultados para o método de Janbu Modificado e a figura 3.9 para o método de Spencer.

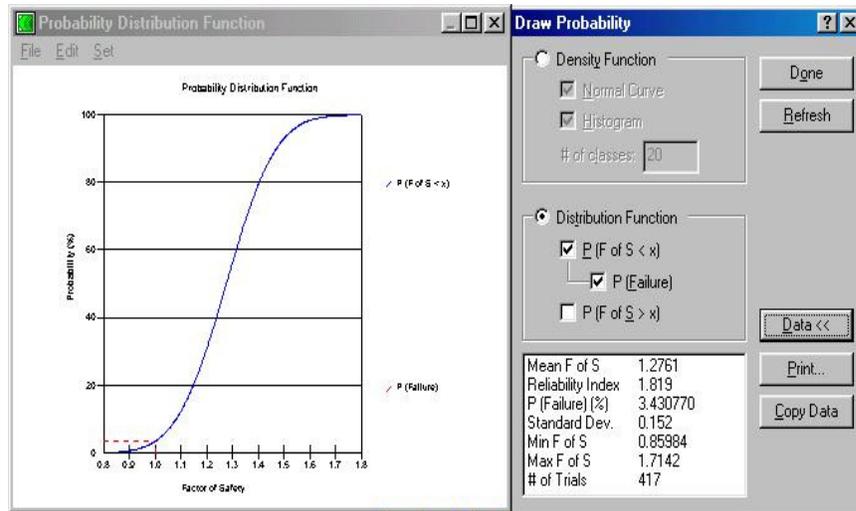


Figura 3.7: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Bishop Modificado ($n = 3$ variáveis)

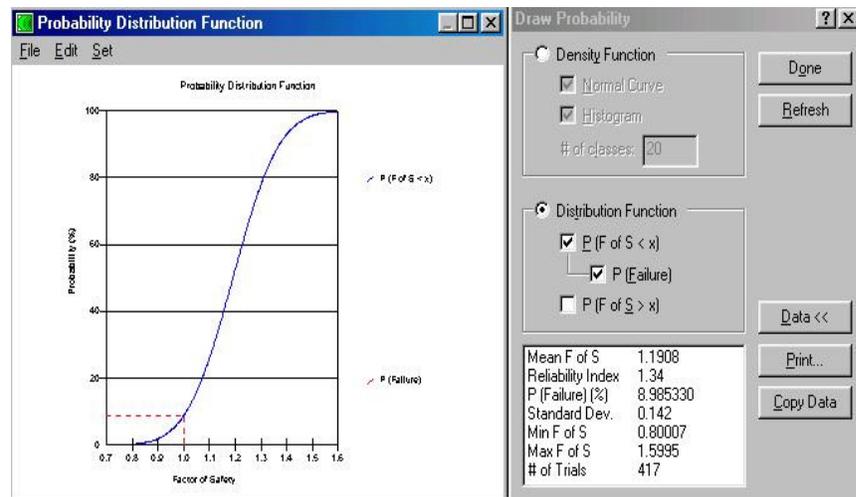


Figura 3.8: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Janbu Modificado ($n = 3$ variáveis)

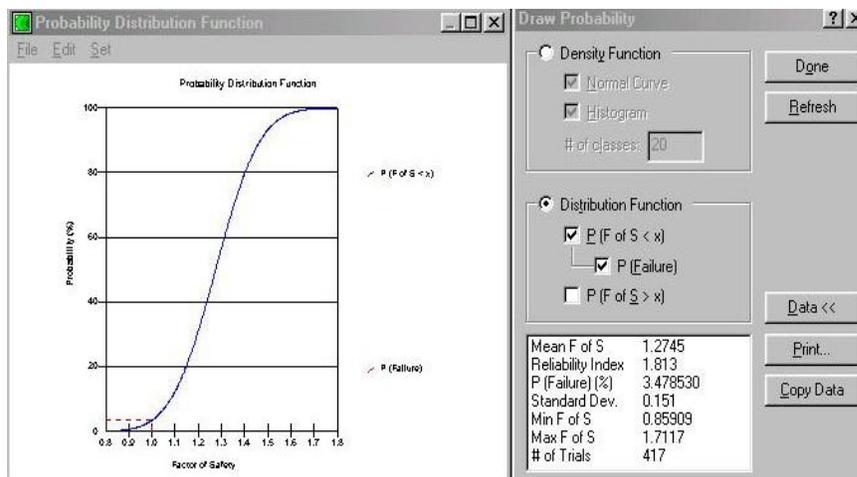


Figura 3.9: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Spencer ($n = 3$ variáveis)

- (ii) $N = 23270$; número de iterações necessárias encontrado por Guedes (1997) na análise do mesmo problema considerando como variáveis aleatórias a coesão, a piezometria, o ângulo de atrito, e os pesos específicos seco e saturado, para uma precisão de $\epsilon = 30\%$ e um nível de confiança de $(1 - \alpha) = 90\%$. Os valores dos fatores de segurança (FS), índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (P_r) assim como o gráfico da função de distribuição de probabilidades são apresentadas nas figuras 3.10 a 3.12.

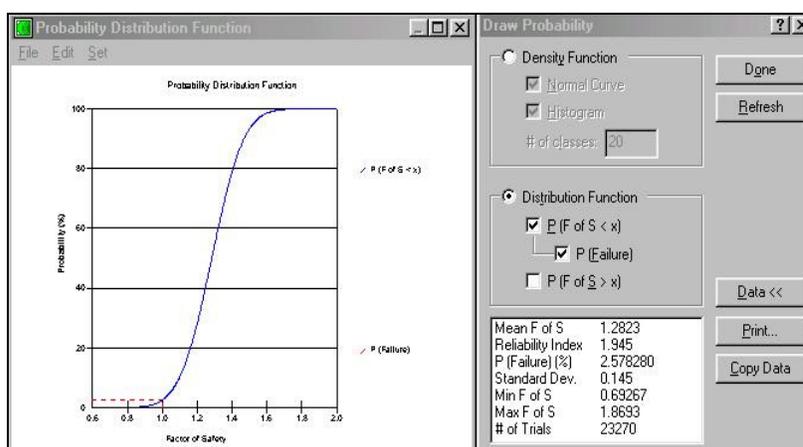


Figura 3.10: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Bishop Modificado ($n = 5$ variáveis)

A figura 3.10 mostra os valores de fator de segurança (FS), índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (P_r) além do gráfico da função de distribuição de probabilidade para a análise do talude genérico de mineração pelo método de Bishop Modificado. A figura 3.11 fornece os mesmos resultados para o método de Janbu Modificado e a figura 3.12 para o método de Spencer.

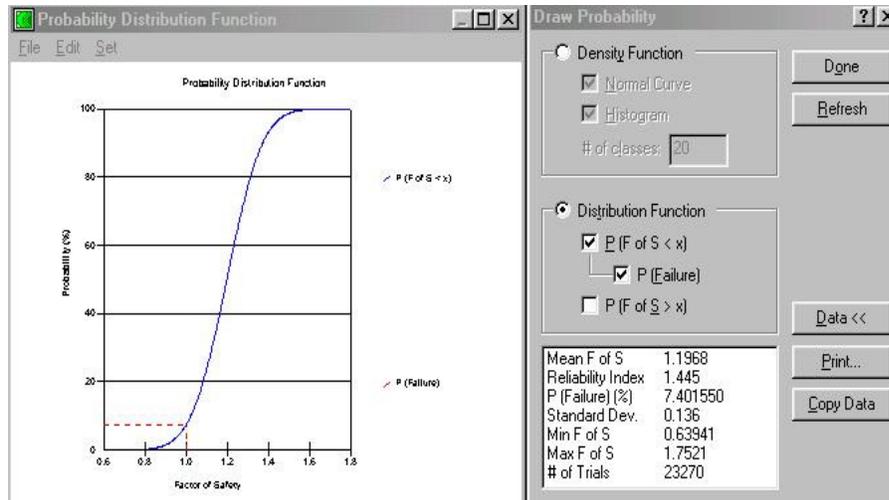


Figura 3.11: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Janbu Modificado (n = 5 variáveis)

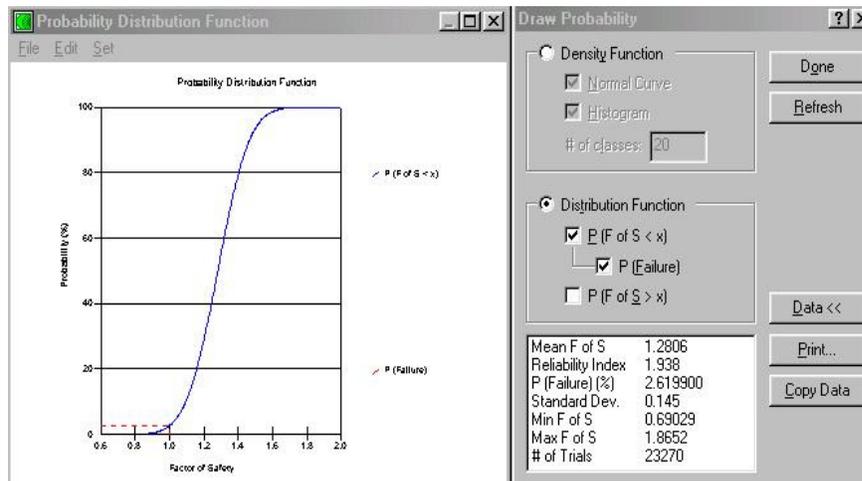


Figura 3.12: Dados de saída do SLOPE/W para a análise probabilística do problema pelo método de Spencer (n = 5 variáveis)

3.6 – Síntese e discussão geral dos resultados

A sistematização geral dos resultados obtidos através das análises determinísticas e probabilísticas, feitas para o talude genérico de mineração considerado, é apresentada na Tabela 3.14. Os resultados obtidos por Guedes (1997) em relação ao mesmo talude estão indicados na tabela 3.15.

Tabela 3.14: Resultados das análises feitas no talude genérico de mineração considerado

Ferramenta	Método	Fator de Segurança (FS)		Índice de Confiabilidade (β)		Probabilidade de ruptura (Pr)	
		3 Variáveis	5 Variáveis	3 Variáveis	5 Variáveis	3 Variáveis	5 Variáveis
GEOSLOPE SLOPE/W (MC)	Bishop Modificado	1,276	1,282	1,819	1,945	3,43%	2,58%
	Janbu Modificado	1,191	1,197	1,34	1,445	8,96%	7,40%
	Spencer	1,274	1,28	1,813	1,938	3,48%	2,62%
Planilhas EXCEL (Low e Tang, 1997) (SM)	Janbu Modificado	1,194		1,245		10,66%	
Método usado por Guedes (1997) (SM)	Janbu Modificado	1,171		1,172		12,10%	
Método proposto por Duncan (2000)	Bishop Modificado	1,282 *		2,11		1,75%	
	Janbu Modificado	1,171 *		1,25		10,50%	
	Spencer	1,281 *		2,11		1,75%	

* - Valores da figura 3.4

(MC) - Método da Simulação de Monte Carlo

(SM) - Método do Segundo Momento de Primeira Ordem

Tabela 3.15: Resultados das análises de (Guedes, 1997) para o mesmo talude

Método	FS médio			β			Pr		
	SM	EP	MC	SM	EP	MC	SM	EP	MC
Bishop Simplificado	1,28	1,27	1,26	1,77	1,54	1,76	3,87%	6,21%	3,92%

(SM) - Método do Segundo Momento de Primeira Ordem

(EP) - Método das Estimativas Pontuais

(MC) - Método da Simulação de Monte Carlo

Guedes (1997)

Constata-se, pela comparação direta entre os resultados de FS dados pelo programa SLOPE/W, utilizando o método de Bishop Modificado, com o peso específico, a coesão e o ângulo de atrito (3 variáveis) como variáveis aleatórias (FS = 1,276), com o valor encontrado por Guedes (1997) para o FS médio pelo Método de Monte Carlo, uma concordância muito boa dos valores (1,276 e 1,26, respectivamente).

Ambas as análises compreenderam o mesmo número de iterações (417). Para este mesmo caso, os índices de confiabilidade e as probabilidades de ruptura encontrados pelo programa SLOPE/W foram 1,819 e 3,43% respectivamente, enquanto que Guedes (1997) obteve os valores 1,76 e 3,92%. Observa-se, portanto, uma boa concordância também entre os resultados obtidos para o índice de confiabilidade.

Para alcançar um resultado com maior precisão e nível de confiança (90%), procedeu-se a uma análise com 5 variáveis e 23270 iterações, obtendo-se, então, uma probabilidade de ruptura (2,58%), menor que a anterior e em uma análise mais confiável.

A análise de estabilidade de taludes determinística através do método de Janbu Modificado (componentes verticais nulas das forças entre as fatias), implementada no EXCEL, forneceu um fator de segurança $FS = 1,194$, enquanto que a estimativa feita em condições similares no programa SLOPE/W (figura 3.4) forneceu um valor de 1,171.

A versão probabilística desta planilha, que utiliza um método equivalente ao Método do Segundo Momento de Primeira Ordem e o Método de Janbu Modificado, apresentou os seguintes resultados: índice de confiabilidade $\beta = 1,245$ e probabilidade de ruptura $P_r = 10,66\%$. A análise probabilística feita no SLOPE/W pelo Método de Janbu Modificado com a Simulação de Monte Carlo resultou em um índice de confiabilidade $\beta = 1,172$ e uma probabilidade de ruptura $P_r = 12,10\%$, bem consistentes com os obtidos pelas planilhas.

Pela avaliação dos dados obtidos pela metodologia proposta por Duncan (2000), verifica-se que se tem também uma boa concordância com os resultados obtidos pelos outros procedimentos. Estas análises, além de outras simulações em casos mais simples, permitiram a verificação da validade dos procedimentos previstos por Low & Tang (1997), formalizados através das planilhas desenvolvidas neste trabalho.

Capítulo 4

Estudo de caso: Taludes da Mina de Gongo Soco/CVRD

4.1 – Introdução

A Mina de Gongo Soco (figura 4.1) está localizada no Município de Barão de Cocais, na região central do Quadrilátero Ferrífero do Estado de Minas Gerais. O acesso à área da mina é feito pela BR-262/381 (Belo Horizonte – Vitória), até o entroncamento com a rodovia estadual MG-435, e, deste ponto, até a cidade de Caeté e à mina, este último trecho sendo de 14 km em estrada não pavimentada. Outro acesso possível é através da cidade de Barão de Cocais, através também de 14 km em estrada não pavimentada. Ramais ferroviários fazem a interligação da mina com os mercados consumidores.

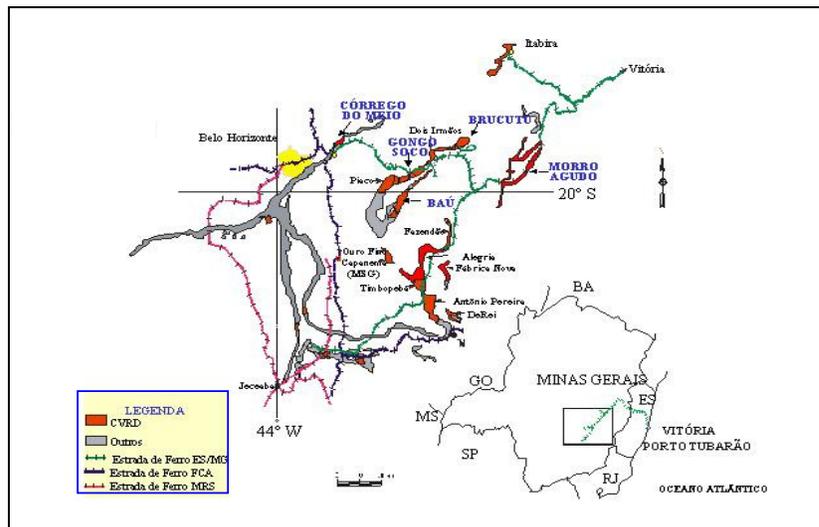


Figura 4.1 – Localização da Mineração Gongo Soco no Quadrilátero Ferrífero

A localização da jazida de minério de ferro de Gongo Soco se dá no local denominado serra do Congo, pertencente a serra do Espinhaço. Regionalmente essa área situa-se na aba setentrional e normal do Sinclinal Gandarela que, na quadrícula de Gongo Soco, mergulha para sul, com ângulos de 40 a 60°.

De acordo com a geomorfologia da área, a região da mina apresenta um relevo montanhoso, com serras alongadas de topos angulosos e vertentes ravinadas com perfis retilíneos (figura 4.2). Ela está situada ao sul das serras do Marembá e Gongo Soco, divisor de águas das bacias dos rios São Francisco e Rio Doce. Possui altitudes variando entre 800 e 1350m, com ocorrência freqüente de litologias meta-sedimentares (formações ferríferas, dolomitos, filitos e quartzitos).



Figura 4.2: Vista aérea da Mina de Gongo Soco evidenciando os aspectos fisiográficos

4.2 – Histórico e Situação Atual da Mina de Gongo Soco

Os serviços pioneiros de mineração na área datam do século XIX durante o ciclo do ouro no Brasil. Entre os anos de 1824 e 1856, Gongo Soco tinha relevância internacional pela alta tecnologia de extração subterrânea aplicada para a época e auge de produção de 12 toneladas de ouro. A Mina de Gongo Soco pertencia à companhia “*Imperial Brazilian Mining Association*”, que se utilizava mão-de-obra escrava em suas atividades mineiras.

De acordo com os relatos históricos, no ano de 1856, a mina subterrânea de ouro foi inundada e todas as atividades interrompidas, dando início a uma fase decadente da

produção de ouro em Gongo Soco. Poucas décadas depois, o explorador inglês W. J. Henwood divulgou um relatório que enfatizava a riqueza desta região em rochas ferríferas com alto teor aurífero. Após este período a atividade minerária em Gongo Soco ficou obscura até 1960, quando a empresa São Carlos Minérios estudou a formação ferrífera e, em 1967, avaliou as reservas de minério de ferro de Gongo Soco.

A fase atual de exploração tornou-se efetiva quando a empresa São Carlos Minérios teve seus direitos minerários arrendados pela Mineração Socoimex Ltda que, em 1989, deu início à operação de lavra da Mina de Gongo Soco, instalando a britagem e peneiramento do minério de ferro. Em 11 de maio de 2000, a mina foi incorporada à Companhia Vale do rio Doce.

Possuindo reservas de 74,5 milhões de toneladas de hematita e 38 milhões de toneladas de itabirito, a Mina de Gongo Soco possui, atualmente, uma cava (Figura 4.3) com extensão de 1,3 km e 700m de largura, com taludes de alturas de 270m (parede norte) e 100m (parede sul).



Figura 4.3 – Vista geral da Mina de Gongo Soco

Por outro lado, a área da mina apresenta uma complexa conjugação de fatores geológicos, hidrogeológicos e geotécnicos que têm causado sérios problemas às operações de lavra e comprometido significativamente os cronogramas previstos de produção exigindo, portanto, estudos concentrados em termos das análises de estabilidade dos taludes com a evolução da cava da mina.

A condição final de cava apresenta dois cenários possíveis, de acordo com as premissas de lavra estabelecidas pela CVRD: o primeiro em que o fundo da mina atinge a elevação 800m e o segundo, na elevação 760m, podendo a cava final alcançar 400m de altura na parede norte e até 230m na parede sul.

O processo atual de exploração apresenta três fases principais: extração e transporte de materiais da cava, beneficiamento do minério em instalações a seco e à úmido e a disposição de rejeitos e estéreis de mina. O minério lavrado passa por uma etapa de britagem e outra de classificação; sendo a última realizada na sua quase totalidade por via úmida. A água utilizada nesse processo é, na sua maior parte, captada através de um sistema de barragem que fornece água ao processo industrial e contém os rejeitos. A capacidade das duas instalações de tratamento (Figura 4.4) é de 7 milhões de toneladas (5.6 milhões por via úmida e 1.4 milhões por via a seco).



Figura 4.4: Planta de tratamento de minério (primeiro plano) e cava (ao fundo)

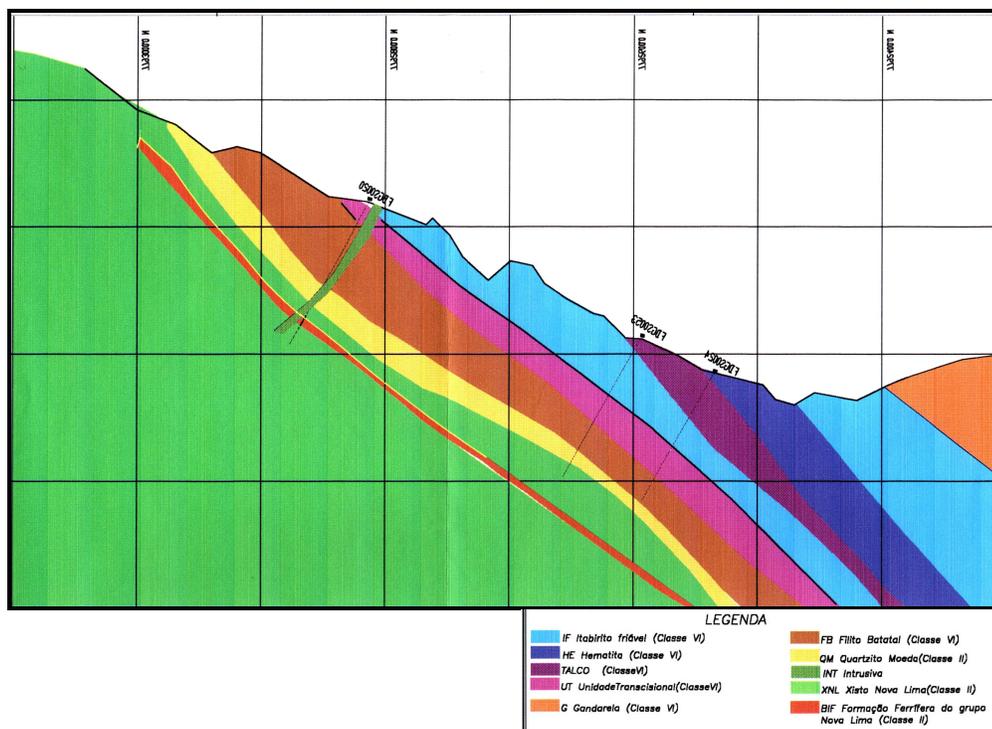
Em condições normais de operação atual, a mina tem a previsão de movimentar cerca de 14 milhões de toneladas de materiais, sendo 7 milhões de minério de ferro destinadas às instalações de tratamento e outros 7 milhões de toneladas de estéreis depositados sob a forma de pilhas. Esse estéril é transportado e disposto em um sistema de depósito controlado, previamente preparado para receber esses materiais, com disposição por bancadas ascendentes.

Os resultados de estudos recentes (Inocentini, 2003) têm demonstrado, entretanto, que esta projeção é inadequada e inconsistente com os condicionantes geotécnicos da mina, implicando, portanto, pesquisas e planejamentos adicionais, particularmente em termos do domínio das características hidrogeológicas dos maciços locais e dos procedimentos de retaludamento da cava, a partir da remoção de elevados volumes de estéreis nas zonas mais altas dos taludes.

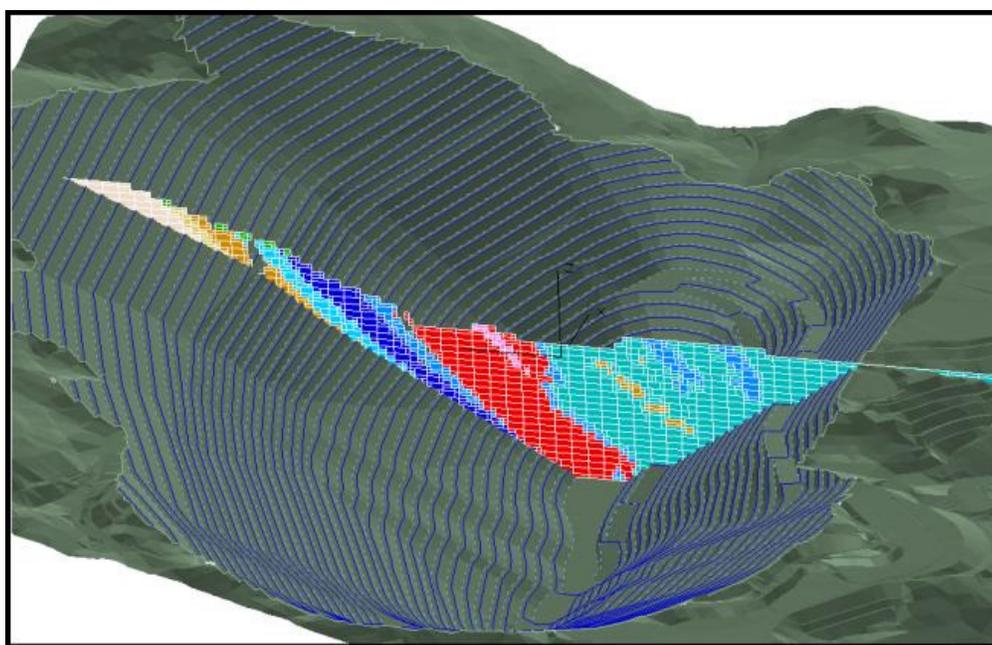
4.3 – Contexto Geológico Local

A elaboração do modelo geológico na área da mina foi produto da interpretação e análise de dois mapeamentos geológicos recentes (Geoestrutural, 2001 e 2002), contemplando escalas entre 1:10.000 e 1:1000 dependendo do detalhamento requerido. O primeiro foi desenvolvido especificamente para a elaboração dos estudos preliminares de estabilidade de taludes, enquanto o segundo, resultou de recomendações do estudo anterior, sendo direcionado à investigação de áreas que apresentavam informações geológicas deficientes.

Estes trabalhos compreenderam a identificação dos principais litotipos da mina, além da delimitação dos contatos e da definição do arcabouço estrutural. Os dados de atitude das feições estruturais foram analisados em estereogramas específicos, individualizados por domínio lito – estrutural. As unidades estratigráficas presentes na mina estão distribuídas entre os supergrupos Rio das Velhas e Minas, cujas principais características, no contexto da mina de Gongo Soco, são descritas resumidamente a seguir (Inocentini, 2003). A figura 4.5 apresenta a seção típica dos taludes locais, com a disposição das principais litologias relativas à cava da mina de Gongo Soco.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Seções típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco

4.3.1 – Supergrupo Rio das Velhas - Grupo Nova Lima

Esta seqüência vulcano-sedimentar possui idade estimada de 2.7 bilhões de anos e aflora em porções localizadas nas partes mais altas da cava. No domínio dos taludes da cava este grupo é constituído por micaxistos ricos em clorita e sericita. Possui ainda níveis delgados decimétricos de formações ferríferas bandadas e níveis de rochas metabásicas concordantes. As rochas alteram-se usualmente em saprolitos silto-argilosos, vermelho rosado a roxo amarelado, conservando foliação muito penetrativa.

Os contatos deste grupo com o Supergrupo Minas são normalmente discordantes, de caráter tectônico, através de zonas de deformação concentrada.

4.3.2 – Supergrupo Minas

Este Supergrupo de idade proterozóica (2,1 a 2,5 bilhões de anos) forma a maior parte da área mapeada, estando sobreposto ao Grupo Nova Lima. É representado pelo Grupo Caraça (formações Moeda e Batatal), Grupo Itabira (formações Cauê e Gandarela) e o Grupo Piracicaba (formações Cercadinho e Fecho do Funil). Serão enfocadas apenas as formações mais relevantes para o modelamento geomecânico e hidrogeológico da mina.

As formações localizadas na área de estudo são as formações Moeda, Batatal, Cauê e Gandarela.

- **Formação Moeda**

A Formação Moeda ocorre nas porções mais altas da cava. É representada por um delgado nível de quartzito micáceo que pode variar para um quartzo-xisto ou para um quartzito microconglomerático. A camada possui uma espessura média de cerca de vinte metros e encontra-se em contato brusco com o Grupo Nova Lima e a Formação Batatal. Ambos os contatos mostram um forte caráter tectônico, exibindo uma intensa milonitização, notadamente na interface com os xistos Nova Lima.

- **Formação Batatal**

É constituída por filitos sericíticos, freqüentemente grafitosos com níveis de quartzito micáceo intercalados. O pacote possui cerca de 30 a 50 metros de espessura e encontra-se bastante decomposto, muitas vezes na forma de solos moles até profundidades de várias dezenas de metros.

- **Unidade Transicional**

Esta unidade representa a transição entre a sedimentação detrítica do Grupo Caraça (Formações Moeda e Batatal) e a sedimentação química do Grupo Itabira (Formações Cauê e Gandarela). É portadora de filitos dolomíticos, filitos sericíticos, metabásicas concordantes (possíveis metavulcânicas) e metacherts ferríferos.

Assim como a Formação Batatal, a Unidade Transicional também encontra-se profundamente decomposta no domínio dos taludes da mina.

- **Formação Cauê**

Ocorre na porção central da mina, apresentando, em planta, uma ligeira sinuosidade motivada por dobras suaves que deformam a foliação. A Formação Cauê é constituída por uma intercalação de itabiritos silicosos e carbonáticos e uma lente decamétrica (*boudin* alongado) de hematita que constitui o minério explotado atualmente na mina.

Os níveis basais da Formação Cauê apresentam-se carbonáticos, em contato com a Unidade Transicional, assim como também no topo, em contato com a Formação Gandarela. O contato basal da hematita com os itabiritos silicosos possui uma proporção elevada de talco, notadamente na porção central da mina.

Neste local, chega a existir uma hematita talco xisto provavelmente derivada de processos de deformação dúctil concentrada. A presença deste mineral no local deve-se

à natureza carbonática do protominério hematítico, gerando talco a partir da entrada de sílica no sistema por tectônica dúctil. Esta faixa talcosa funciona como uma barreira hidráulica para os fluxos de água subterrâneos, podendo condicionar zonas de risco geotécnico, localizadamente.

- **Formação Gandarela**

É constituída por um pacote estratificado portador, da base para o topo, de itabiritos carbonáticos e/ou anfibolíticos, dolomitos ferro-manganesíferos predominantes e dolomitos cinzas, incluindo também nível persistente de dolomitos ferro-manganesíferos silicoso, filito e metabásicas que gradam, em direção ao topo da formação, para dolomitos claros mais ou menos homogêneos.

No domínio da cava, a Formação Gandarela ocorre apenas com a seqüência estratificada basal e exhibe sempre o aspecto alterado argiloso, apresentando cor marrom café a ocre, típicas da alteração de carbonatos.

- **Coberturas Cenozóicas**

Recobrando especialmente a porção superior do pacote da Formação Gandarela, ocorre um depósito em forma de bacia alongada, preenchendo uma possível depressão fechada. Pode-se admitir uma gênese por dissolução, seguida de preenchimento da faixa de um eventual nível mais carbonático, já sem relictos, ou o preenchimento de uma depressão tectogênica.

As espessuras deste depósito, em suas porções centrais, assumem dezenas de metros. São constituídos por colúvio argilo-arenoso avermelhado, laterizado, com nível basal de cascalho com seixos angulosos de hematita cujos diâmetros atingem até 50cm. Os depósitos apresentam falhas estriadas e espelhadas em seu interior que podem refletir atividades neotectônicas superimpostas ou recalques do depósito em função da evolução do relevo.

4.4 – Modelação Geomecânica dos Maciços Locais

A aplicação de uma classificação geomecânica na mina foi adotada para permitir a individualização e compartimentação de grupos de maciço com propriedades de resistência e de deformabilidade distintas. Foram adotados, então, critérios e procedimentos usuais de domínio do meio técnico, visando a identificação e delimitação dos tipos de maciço, tendo em vista as diferentes propriedades geomecânicas e as solicitações atuantes.

Neste sentido, adotou-se a classificação de Bieniawski (1974) para a identificação dos tipos de maciço que ocorrem na mina. A opção pela classificação de Bieniawski 1974, relativamente à mais atual de 1989, foi feita também pelo fato de que esta última penalizaria ainda mais o maciço rochoso da mina com a inclusão dos parâmetros relacionados à orientação das descontinuidades e à posição do nível d'água. Estes parâmetros já são considerados na execução das análises de estabilidade.

Através da determinação do parâmetro RMR, as rochas foram classificadas em duas categorias. A primeira, com exceção da zona superficial de 50m com material alterado, constituída por xistos e quartzitos competentes, foi caracterizada como classes II e III. A segunda categoria, composta pelas rochas remanescentes, constituídas por materiais incompetentes, foi classificada como classes IV e VI.

Como a cava ainda não está profunda, os maciços dominantes são os de menor resistência, correspondendo ao termo alterado, designado de Classe VI (figura 4.6). Os demais termos, correspondentes aos maciços de média e alta resistência, correspondentes às Classes II, III e IV, afloram em pontos isolados, formando um padrão de manchas no mapa geomecânico.

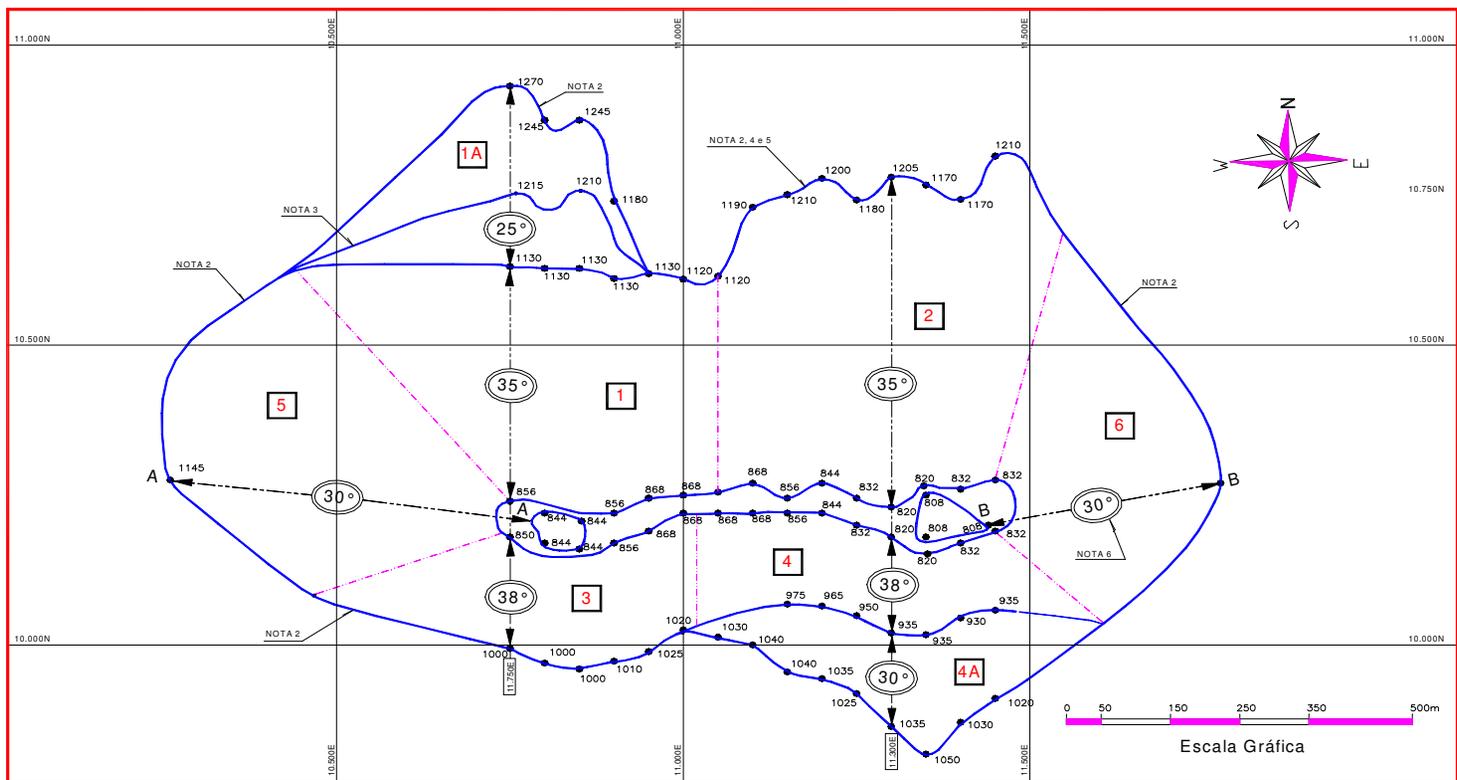
A forma alongada das manchas delineadas pela foliação define a forma de ocorrência e a distribuição em pontões, configurando um perfil serrilhado. Por outro lado, verifica-se que é relativamente comum a interdigitação de horizontes controlados pela foliação constituídos por maciços classe VI imersos em maciços classe III e mesmo II.



Figura 4.6 – Classificação geomecânica dos maciços da Mina de Gongo Soco

Em função destes estudos e visando estabelecer as análises de estabilidade, a cava foi subdividida em setores de projeto, em função da distribuição e ocorrência da hematita talcosa da Formação Cauê e do filito Batatal nos taludes da área norte e da espessura dos dolomitos da Formação Gandarela no talude sul da cava. Os taludes situados nas áreas oeste e leste da cava também foram setorizados, visando uma abrangência das análises de estabilidade em função da direção da orientação dos taludes com a foliação. Com base neste critério, a cava foi subdividida em seis (6) setores de projeto, indicados na Figura 4.7, da seguinte forma:

- Talude Norte: Setor 1: o filito possui influência significativa nas análises de estabilidade por ser um constituinte dos taludes operacionais; Setor 2: a hematita talco-xisto é a principal condicionante geotécnica para este setor;
- Talude Sul: Os setores 3 e 4 foram subdivididos em função da espessura de dolomito;
- Taludes Oeste e Leste: os setores 5 e 6 representam os taludes oeste e leste, respectivamente.



LEGENDA

- 1 SETOR DE PROJETO
- 4A SUBSETOR
- 35° INCLINAÇÃO TALUDE (MACIÇO DRENADO – FS.> 1,30)
- LIMITE ENTRE SETORES
- 11.300E SEÇÕES DE ANÁLISES DE ESTABILIDADE
- 1000 COTAS

NOTAS:

- 1) ELEVAÇÕES E DIMENSÕES EM METRO.
- 2) CONTORNO DA CAVA PARA A INCLINAÇÃO INDICADA DOS TALUDES
- 3) LIMITE PARA TALUDE COM 35°, CASO OCORRA MACIÇO CLASSE IV/III ACIMA DA COTA 1130.
- 4) LIMITE CONDICIONADO PELA OCORRÊNCIA MACIÇO CLASSE IV/III ACIMA DA COTA 1130.
- 5) SE NÃO HOUVER MACIÇO CLASSE IV/III ACIMA DA COTA 1130, A INCLINAÇÃO ESTÁVEL DE 25° É IMPRATICÁVEL, POIS É SUBPARALELA À TOPOGRAFIA.
- 6) INCLINAÇÃO CONDICIONADA PELA MÁXIMA RECUPERAÇÃO HEMATITA (FS= 1,56)
- 7) A INCLINAÇÃO DOS SETORES ESTIMADA PELAS ANÁLISES DAS SEÇÕES INDICADAS.
- 8) GEOMETRIA PARA MACIÇO DRENADO.

Figura 4.7 – Setorização geomecânica da Mina de Gongo Soco

4.5 – Modelação Hidrogeológica da Mina de Gongo Soco

As principais condicionantes geotécnicas para a estabilidade dos taludes da mina referem-se aos aspectos hidrogeológicos locais em termos das poropressões geradas nos maciços, oriundas de diferentes sistemas aquíferos. A partir da análise da geologia da área, das características hidrogeológicas dessas unidades e dos níveis piezométricos já identificados, pôde-se definir os sistemas e unidades aquíferas presentes na região de Gongo Soco e, ainda, uma compartimentação hidrogeológica marcante que determina, de modo notável, a circulação das águas subterrâneas nessa parte do Sinclinal Gandarela.

Assim, está bem caracterizado que a circulação da água subterrânea se faz predominantemente ao longo do plano de foliação das unidades aquíferas identificadas, não havendo, ao que se supõe, uma inter-relação relevante das águas dos vários aquíferos presentes, sempre isoladas por rochas impermeáveis, que se caracterizam como aquíferos e aquícludes. Esse fenómeno é extremamente importante no que diz respeito aos impactos do rebaixamento de nível d'água a ser implantado na Mina do Gongo Soco, uma vez que não deverá haver maiores reflexos do rebaixamento promovido na Formação Ferrífera nos demais sistemas aquíferos.

Os principais sistemas aquíferos identificados na mina do Gongo Soco são, em graus de relevância relativa, o Aquífero Cauê e o Aquífero Cercadinho e, secundariamente, o Aquífero Moeda. Estão ainda presentes zonas aquíferas cársticas no Aquífero Gandarela, ainda pouco estudadas e faixas aquíferas subordinadas, intercaladas nos xistos Nova Lima. Ocorrem ainda formações aquíferas superficiais granulares em cangas e depósitos de fluxo gravitacional mais recentes, a partir dos quais ocorre a alimentação dos aquíferos subjacentes (Sobreiro, 2001).

Com base nas análises precedentes, estabeleceu-se um modelo de compartimentação hidrogeológica do maciço, identificando-se os principais aspectos ligados às condições de saturação de interesse aos estudos de estabilidade dos taludes da cava. Assim, os dados levantados permitiram estabelecer que (Inocentini, 2003):

- O Grupo Nova Lima e o Supergrupo Minas constituem aquíferos diferenciados;
- No Supergrupo Minas, a Formação Cauê (formação ferrífera) constitui o principal aquífero da mina exigindo o rebaixamento do N. A. para permitir a escavação de lavra;
- Os quartzitos da Formação Moeda constituem outro aquífero relevante na mina;
- Os filitos da Formação Batatal e a Unidade Transicional estão saturados, constituindo uma barreira hidráulica, aquíclude e aquícardo, entre as unidades aquíferas da Formação Cauê com o quartzito Moeda e os xistos do Grupo Nova Lima.

Os dados demonstraram ainda que o maciço está completamente saturado a partir da Unidade Transicional e do topo do filito Batatal, adentrando pelo quartzito da Formação Moeda e demais litotipos do Grupo Nova Lima, ocorrendo condições de pressurização, evidenciadas pelos artesianismos detectados nas sondagens e nos piezômetros instalados.

Na Unidade Transicional a presença de aquícludes e aquícardos, delineados pelos corpos de filitos sericíticos e metabásicas, geram condições para o confinamento interno dos aquíferos formados pelos corpos de metachert e quartzitos ferruginosos.

A presença de aquícardos e aquícludes, entre a formação ferrífera e os demais litotipos da seqüência tecto-estratigráfica inferior, impede o rebaixamento e a despressurização do maciço do talude do setor norte, através do bombeamento na área de lavra nas unidades da Formação Cauê.

Nos setores oeste e leste, onde grande parte dos taludes serão conformados na formação ferrífera, deverá ocorrer um rebaixamento parcial do maciço, pois, na base da seqüência tecto-estratigráfica, ainda ocorrem os aquícludes e aquícardos formados pela Unidade Transicional e pelo filito Batatal e demais unidades mencionadas acima.

Nos maciços do talude norte, a partir da Unidade Transicional e do Filito Batatal, para efeito de estudos de estabilidade, o maciço deverá ser considerado saturado. Nos taludes do setor norte, a partir da unidade transicional e do filito Batatal, a condição drenada somente poderá ser assegurada através da implantação de um sistema específico de rebaixamento do nível de água no maciço.

No talude Sul, através dos resultados do monitoramento piezométrico, a presença de aquícludes, no contato entre a formação ferrífera e a formação Gandarela, impede o rebaixamento e a despressurização do maciço do talude do setor norte, através do bombeamento na área de lavra nas unidades da Formação Cauê. Para efeito de estudos de estabilidade, analogamente aos taludes do setor norte, o maciço deverá ser considerado saturado e a condição drenada somente poderá ser assegurada através da implantação de um sistema específico de rebaixamento do nível de água no maciço.

4.6 – Síntese Geral dos Estudos

Um extenso programa de investigações geológicas, litoestruturais, geomecânicas, hidrogeológicas e geotécnicas, compreendendo trabalhos de mapeamento da área, ensaios de laboratório, ensaios de campo, instrumentação do maciço, execução de poços e análises de estabilidade, foi implementado pela CVRD com o objetivo de prover uma sólida base científica de conhecimento sobre as condições atuais e de possíveis cenários de evolução para o comportamento geotécnico dos taludes da Mina de Gongo Soco.

Tais estudos constituem os subsídios para a reavaliação contínua e sistemática das condições de estabilidade dos taludes da mina. Os trabalhos de investigação têm evidenciado, inclusive, uma continuidade da Formação ferrífera além dos limites da cava atual, que levaram a CVRD a desenvolver estudos complementares para o aproveitamento econômico desse corpo adicional de minério. Nesse contexto, a CVRD definiu a geometria da cava de expansão, visando maximizar a reserva lavrável. Entretanto, devido à complexidade geológico – geotécnica dos maciços que irão compor

os taludes, os estudos de estabilidade da cava de expansão constituem um fator de relevância fundamental na correlação custos – benefícios do empreendimento.

Durante o processo de lavra na cava da mina, foram descobertas também novas feições geológicas, de extrema importância para uma melhor compreensão geomecânica e hidrogeológica dos taludes da mina de Gongo Soco. Assim, o presente estudo constitui uma reavaliação de condições abordadas em trabalho anterior (Inocentini, 2003), incorporando novos dados e resultados de investigações geológicas e geotécnicas mais detalhadas, além da implementação de novas ferramentas geotécnicas de análise, entre as quais a realização de abordagens probabilísticas e de confiabilidade nas análises de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo soco.

Capítulo 5

Caracterização Geotécnica e Determinação de Parâmetros para as Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo Soco

5.1 – Investigação Geotécnica em Laboratório

Os estudos de investigação geotécnica e hidrogeológica dos taludes da cava de Gongo Soco incluíram campanhas de ensaios de laboratório (em solos e em rochas) e sondagens rotativas, bem como o monitoramento piezométrico da cava e a execução de ensaios hidrodinâmicos realizados em poços de investigação.

No total, foram coletadas 45 amostras indeformadas de solos abrangendo as seguintes litologias: xisto, quartzito, filito, unidade transicional, itabirito friável, hematita talcosa, hematita pulverulenta, hematita friável e itabiritos carbonáticos, que constituem as principais litologias presentes na cava da mina.

As amostras de rochas foram obtidas a partir das sondagens rotativas executadas em xistos, quartzitos, itabiritos e filitos. Os itabiritos silicosos apresentaram uma dificuldade maior de amostragem, não sendo assim, possível moldar corpos de prova para os ensaios triaxiais previstos, que foram então, substituídos por ensaios de cisalhamento direto.

5.1.1 – Ensaios em Solos

O programa experimental contemplou ensaios de caracterização (granulometria e plasticidade), ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais do tipo CU, a partir das amostras coletadas. Os ensaios de caracterização incluíram análises granulométricas, limites de consistência (w_L e w_p), pesos específicos das partículas sólidas (γ_s), pesos específicos secos (γ_d) e umidades naturais (w) dos solos ensaiados (Tabela 5.1).

Tabela 5.1- Resultados dos ensaios de caracterização

Poço	Amostra	Tipo de Material	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	w _L (%)	w _P (%)	I _p (%)
	01	Filito com intercalações de quartzito	27,95	17,63	3,4	30	25	5
			27,99	17,28	3,0			
P01	02	Filito com intercalações de quartzito	29,92	-	-	39	29	10
			29,82	-	-			
	04	Filito	25,83	17,31	12,0	27	21	6
			26,31	17,00	15,3			
			-	17,01	14,9			
P02	02	Xisto	27,90	12,83	14,8	32	18	14
			27,95	14,13	12,5			
			-	14,04	9,5			
P03	02	Quartzito	28,77	16,08	19,0	NL	NP	-
			28,63	16,31	15,1			
P03	03	Quartzito	27,45	17,10	8,1	NL	NP	-
			27,70	16,94	11,7			
			-	16,15	16,6			
	03	Hematita Pulverulenta	51,61	30,53	4,4	NL	NP	-
			50,94	31,42	4,5			
	01	Itabirito dolomítico	31,87	19,62	6,8	NL	NP	-
			31,78	19,66	5,9			
P06 A	02	Dolomito Transicional	32,82	13,87	33,0	51	34	17
			32,83	14,87	25,5			
	04	Dolomito Transicional	34,47	16,42	21,0	26	19	8
			34,41	17,69	16,7			
	03	Itabirito friável	35,59	24,47	9,9	NL	NP	-
			35,20	23,19	10,1			
			-	22,56	9,4			
	04	Hematita Friável	49,62	26,99	7,2	22	13	9
			50,84	28,25	8,3			
			-	24,94	9,0			
	03 e 04	Itabirito Friável	31,87	23,73	4,6	NL	NP	-
			31,87	-	-			
P10	02	Hematita Talcosa	38,98	-	-	NL	NP	-
			39,03	-	-			
	03	Hematita Talcosa	54,27	26,58	8,1	NL	NP	-
			54,46	24,00	13,9			
			-	24,33	10,2			

Obs: I_p: Índice de plasticidade: I_p = w_L - w_P

γ_s : Peso específico dos grãos

γ_d : Peso específico do solo seco

w: umidade natural do solo

w_L: Limite de liquidez

NL: sem liquidez

w_P: Limite de plasticidade

NP: sem plasticidade

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras indeformadas na umidade natural. Os corpos-de-prova foram moldados por talhamento e em molde cilíndrico com dimensões aproximadas de 20 x 20 cm. Os ensaios foram conduzidos sob tensões normais de 100, 200, 400 e 600 kN/m², em prensa convencional de carga controlada.

Os ensaios de compressão triaxial adensados e não-drenados foram realizados com saturação dos corpos-de-prova e medida das poropressões geradas. Os corpos-de-prova foram moldados por talhamento e torneamento, com exceção dos corpos-de-prova da amostra do poço P09 que foram moldados por compactação estática na densidade e umidade do bloco indeformado. A saturação dos corpos-de-prova foi feita por contra-pressão de 300 kN/m², aplicada em estágios de 50 kN/m², após saturação inicial por percolação ascendente por, no mínimo, 24 horas. Os ensaios foram conduzidos sob tensões confinantes de 98, 294, 490 e 686 kN/m², sendo a velocidade de deformação de 0,083 mm/min para os corpos-de-prova do poço P05 e amostra 04 do poço P01, de 0,16 mm/min para os corpos-de-prova do poço P01, P02, P03, P06 e P08 e de 0,20 mm/min para os do poço P10.

Em ambas as metodologias, investigou-se a anisotropia da resistência das litologias típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco. Resultados típicos dos ensaios (acréscimos de tensões axiais x deformações específicas axiais e círculos de Mohr para tensões efetivas) são apresentados na Figura 5.1 para o caso dos filitos da cava, para condições de cisalhamento paralelo à foliação.

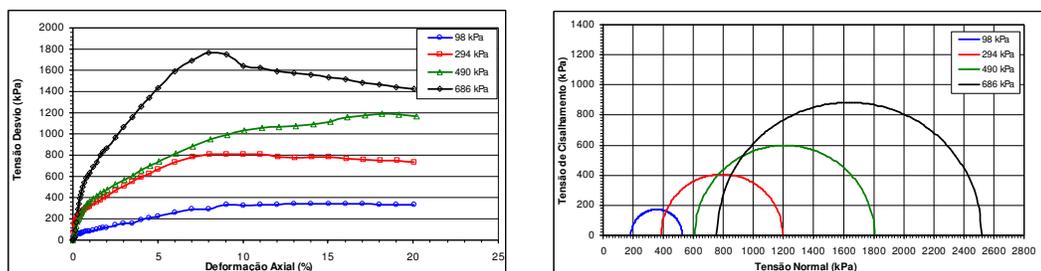


Figura 5.1- Resultados dos ensaios triaxiais CU em amostras de filito (cisalhamento paralelo à foliação)

5.1.2 – Ensaios em Rochas

Para as litologias típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco, foram realizados ensaios triaxiais e ensaios de compressão diametral (ensaio brasileiro). Os ensaios de compressão triaxial foram realizados em corpos de prova de xistos, quartzitos e itabiritos locais, de acordo com os procedimentos prescritos pela ISRM - International Society of Rock Mechanics - “Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression” (Brown, 1981).

Os ensaios foram realizados utilizando-se máquina rígida servo-controlada, com capacidade de aplicação de 5,0 MN de carga axial, 140 MPa de tensão confinante e rigidez de 5,02 MN/mm. Resultados típicos dos ensaios triaxiais realizados estão apresentados na Figura 5.2 para uma amostra de itabirito, ensaiada sob uma tensão de 16 MPa. Nos ensaios realizados, constatou-se uma forte influência devido à heterogeneidade estrutural dos corpos de prova ensaiados.

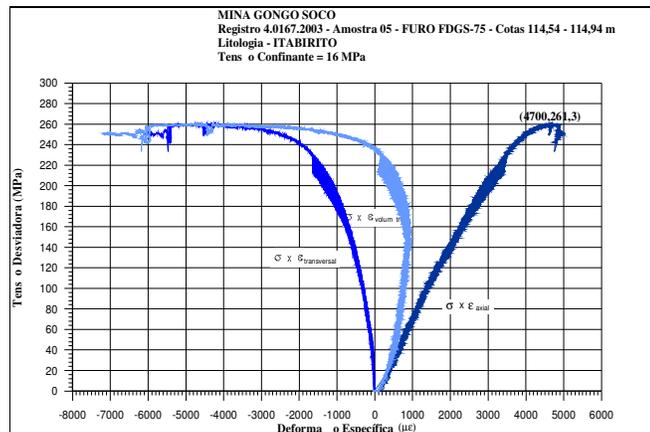


Figura 5.2 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial em amostra de itabirito (tensão confinante de 16 MPa)

A tabela 5.2 apresenta a sistematização dos resultados obtidos, incluindo valores de velocidades de propagação de ondas, para melhor aferição das heterogeneidades estruturais das litologias analisadas. A síntese dos resultados obtidos nas campanhas de ensaios com solos e rochas típicas presentes nos taludes da cava de Gongo Soco está apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.2 - Resultados dos ensaios de compressão triaxial em litologias típicas dos taludes da Mina de Gongo Soco (Sobreiro & Innocentini, 2001)

Litologia	Identificação Furo de Sondagem	Amostra	Tensão Confinante (MPa)	Tensão Desviadora (MPa)	Densidade natural KN/m ³	Velocidade de propagação de ondas (m/s)
Quartzito	-	-	2,0	64,8	26,22	3683
Quartzito	-	-	4,0	79,9	26,37	5144
Quartzito	PFFFNL 04	15	8,0	99,8	26,21	4836
Quartzito	PFFFNL 04	16	16,0	85,1	26,09	4822
Itabirito	FDGS - 75	01	2,0	14,9	34,05	4056
Itabirito	FDGS - 75	04	4,0	154,77	34,25	4994
Itabirito	FDGS - 75	03	8,0	98,33	34,23	4876
Itabirito	FDGS - 75	05	16,0	261,30	34,85	4681
Xisto	FDGS 67	06	2,0	29,1	29,57	3914
Xisto	Dreno 01	D	4,0	30,4	29,37	4505
Xisto	Dreno 02	C	8,0	69,2	27,64	4423
Xisto	FDGS 67	06	16,0	64,6	34,91	5214

Tabela 5.3 – Síntese dos Resultados dos ensaios CD e triaxiais

Litologia	Estado	Ensaio			
		Triaxial		Cisalham. Direto	
		⊥	//	//	⊥
Filito	Solo	c = 0 φ = 36°	c = 0 φ = 35°		
Filito c/ Quartzito	Solo	c = 10 φ = 37°	c = 10 φ = 26°		
Filito	Rocha				
Xisto	Solo				c = 100 φ = 25°
Xisto Nova Lima	Rocha			c = 4000 φ = 36°	
Quartzito	Solo	c = 0 φ = 36°	c = 0 φ = 32°		
Quartzito Moeda	Rocha				c = 11000 φ = 46°
Itabirito Friável	Solo Moldado	c = 50	φ = 38°		
Itabirito Dolomítico	Solo	c = 40 φ = 37°	c = 10 φ = 37°		
Itabirito	Rocha				c = 10000 φ = 55°
Formação Ferrífica N.L.	Rocha				
Hematita Pulverulenta	Solo			c = 110 φ = 40°	
Hematita Friável	Solo				c = 180 φ = 32°
Hematita Talcosa	Solo	c = 20 φ = 23°	c = 0 φ = 32°		
Talco	Retro - Análise	c = 0 φ = 18°			
Dolomito Transicional		c = 20 e 10 φ = 32° e 39°			

⊥: ruptura perpendicular à foliação; //: ruptura paralela à foliação; c em kN/m²

5.2 – Investigação Geotécnica em Campo

Desde 2001, uma extensa campanha de sondagens rotativas foi realizada em diferentes seções dos taludes da cava, subsidiando descrições de perfis geológico-geotécnicos da área e coletas de amostras de xistos, quartzitos, itabiritos e filitos para a realização de ensaios em laboratório.

Simultaneamente, procedeu-se a um amplo programa de monitoramento piezométrico da área da cava, com a instalação de diversos drenos visando estabelecer sistemas de controle de despressurização e piezômetros, para medidas de poropressões ao longo das diferentes litologias presentes. Uma campanha de pesquisa hidrogeológica sistemática foi implementada em meados de 2001, através da perfuração de três poços tubulares profundos. Em cada locação, foram instalados piezômetros de acompanhamento de níveis, para a interpretação dos dados de ensaios de bombeamento.

Para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, foram realizados dois ensaios: o primeiro foi um teste de rebaixamento que teve a duração de 48h, seguido pelo teste de recuperação, que também teve a duração de 48h; o segundo ensaio foi um teste escalonado em três etapas. O primeiro ensaio teve como objetivo a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, enquanto o segundo objetivou a definição da equação característica do poço e de suas condições ótimas de exploração.

O monitoramento de níveis, efetuado antes do início da operação dos poços, permitiu a caracterização do regime hidrogeológico natural na região. Assim, foi possível verificar que as distintas unidades aquíferas identificadas apresentavam níveis potenciométricos bastante distintos, com o que se pode presumir, desde o princípio, uma independência da circulação das águas subterrâneas entre as várias unidades hidrogeológicas presentes.

Com base nas análises precedentes, estabeleceu-se um modelo de compartimentação hidrogeológica do maciço, identificando-se os principais aspectos ligados às condições de saturação de interesse aos estudos de estabilidade dos taludes da cava. Assim, os dados levantados permitiram estabelecer que (Inocentini, 2003):

- O Grupo Nova Lima e o Supergrupo Minas constituem aquíferos diferenciados;
- No Supergrupo Minas, a Formação Cauê (formação ferrífera) constitui o principal aquífero da mina exigindo o rebaixamento do N. A. para permitir a escavação de lavra;
- Os quartzitos da Formação Moeda constituem outro aquífero relevante na mina;
- Os filitos da Formação Batatal e a Unidade Transicional estão saturados, formando uma barreira hidráulica, aquioclude e aquitardo, entre as unidades aquíferas da Formação Cauê com o quartzito Moeda e os xistos do Grupo Nova Lima.

Os dados demonstraram ainda que o maciço está completamente saturado a partir da Unidade Transicional e do topo do filito Batatal, adentrando pelo quartzito da Formação Moeda e demais litotipos do Grupo Nova Lima, ocorrendo condições de pressurização, indicados pelos artesianismos detectados nas sondagens e nos piezômetros instalados.

Na Unidade Transicional a presença de aquiocludes e aquitardos, delineados pelos corpos de filitos sericíticos e metabásicas, geram condições para o confinamento interno dos aquíferos formados pelos corpos de metachert e quartzitos ferruginosos. A presença de aquitardos e aquiocludes entre a formação ferrífera e os demais litotipos da seqüência tecto-estratigráfica inferior, impede o rebaixamento e a despressurização do maciço do talude do setor norte, através do bombeamento na área de lavra nas unidades da Formação Cauê.

Nos setores oeste e leste, onde grande parte dos taludes serão conformados na formação ferrífera, deverá ocorrer um rebaixamento parcial do maciço, pois, na base da seqüência tecto-estratigráfica, ainda ocorrem os aquiocludes e aquitardos formados pela Unidade Transicional e pelo filito Batatal e demais unidades mencionadas acima.

Nos maciços do talude norte, a partir da Unidade Transicional e do Filito Batatal, para efeito de estudos de estabilidade, o maciço deverá ser considerado saturado. Nos taludes do setor norte, a partir da unidade transicional e do filito Batatal, a condição drenada somente poderá ser assegurada através da implantação de um sistema específico de rebaixamento do nível de água no maciço.

No talude Sul, a presença de aquícludes, no contato entre a formação ferrífera e a formação Gandarela, impede o rebaixamento e a despressurização do maciço do talude norte, através do bombeamento na área de lavra nas unidades da Formação Cauê. Para os estudos de estabilidade, analogamente aos taludes do setor norte, o maciço deverá ser considerado saturado e a condição drenada somente poderá ser assegurada através da implantação de um sistema específico de rebaixamento do nível de água no maciço.

Neste contexto, procedeu-se à implantação de sistemas específicos de novos drenos e piezômetros para efeito de despressurização global dos maciços. Os piezômetros foram instalados nas principais litologias da mina (xisto Nova Lima, quartzito, filito e unidade transicional. Seis drenos de despressurização, com inclinação de 60° e profundidades variando entre 100 e 230 m, foram instalados na parede norte da cava.

Esta campanha de drenagem apresenta-se subdividida em duas áreas de pesquisa: a primeira tem como principal finalidade a despressurização do nível d'água das rochas encaixantes (unidade transicional, filito Batatal, quartzito Moeda e xisto Nova Lima) da Formação Ferrífera; a segunda tem como objetivo a despressurização do nível d'água confinado pelo talco-xisto no interior da Formação Ferrífera.

5.3 – Critérios Adotados para as Análises de Estabilidade

5.3.1 – Condicionantes Geológicos e Hidrogeológicos

Com base nos estudos preliminares realizados, que compreenderam a modelação geológica da mina, trabalhos de investigação geotécnica e hidrogeológica e a caracterização geomecânica dos maciços rochosos da cava, tornou-se possível explicitar os principais condicionantes geológicos e hidrogeológicos na análise da estabilidade dos taludes da mina de Gongo Soco, sistematizados da seguinte forma:

- (i) influência decisiva do corpo de talco presente na formação ferrífera, dos corpos de filitos (sericíticos e grafitosos) do Grupo Caraça e das lentes de

quartzo xisto e metachert do Grupo Nova Lima nas análises aplicadas aos talude norte da mina;

- (ii) o corpo de talco mostra-se sempre alterado, com continuidade em extensão e profundidade, e por possuir baixa característica de resistência, seu posicionamento espacial pode condicionar rupturas de taludes;
- (iii) os filitos normalmente encontram-se bastante decompostos, até várias dezenas de metros, e também possuem baixas características de resistência, sendo um dos componentes que deverão governar o comportamento geotécnico dos taludes;
- (iv) são também importantes para a compreensão do comportamento do maciço outras formações litológicas, como a unidade transicional e as rochas básicas que ocorrem em forma de diques;
- (v) as análises deverão incorporar as influências específicas de zonas de cisalhamento/milonítica, bem como das descontinuidades presentes. Em princípio, o talude norte constituído por xistos, quartzitos, filitos e formação ferrífera possui foliação subparalela à direção geral dos taludes, com mergulho entre 55° e 60° para o interior da cava, portanto em posição desfavorável à estabilidade. O talude sul apresenta foliação com mergulho para dentro do maciço, em torno de 60° , portanto em situação aparentemente favorável (ainda assim, são necessárias análises específicas para avaliação e potenciais rupturas condicionadas por tombamento de blocos);
- (vi) quanto aos aspectos hidrogeológicos, deve-se destacar que os quartzo-xistos e metacherts do Grupo Nova Lima, os quartzitos do Grupo Caraça e a formação ferrífera do Grupo Itabira constituem aquíferos distintos;
- (vii) o rebaixamento do nível de água da cava não deverá se propagar proporcionalmente para o interior do Talude Norte, devido à existência de

barreiras hidráulicas formadas pelo corpo de talco na formação ferrífera, pelos filitos do Grupo Caraça e pelos xistos do Grupo Nova Lima, podendo gerar gradientes significativos;

- (viii) a depressurização dos taludes da face Norte deverá se constituir num dos pontos mais importantes do estudo. Com efeito, a obtenção de ângulos de taludes mais favoráveis para a relação custo/benefício dependerá da possibilidade de se conseguir soluções viáveis para a diminuição da pressão de água aprisionada nos quartzo-xistos/metacherts do Grupo Nova Lima e nos quartzitos do Grupo Caraça;
- (ix) no talude sul, onde ocorre a Formação Gandarela, poderão ocorrer processos de subsidência, devido ao rebaixamento que vem sendo executado para a operação de lavra. Estas subsidências poderão acarretar instabilidades localizadas de taludes;
- (x) De um modo geral, a unidade transicional, o filito e o itabirito silicoso são as litologias de maior heterogeneidade, tanto em superfície quanto em profundidade (fato constatado através de testemunhos de sondagem, que mostraram uma compartimentação do maciço em duas áreas, uma situada a oeste da mina, onde há predomínio de material de aspecto de solo, enquanto que, a leste, há certa influência de material mais resistente). As outras unidades (xisto e quartzito) apresentam apenas dois comportamentos distintos, um nível superficial mais alterado (domínio de solo) e outro mais são (rocha) em profundidade;
- (xi) a anisotropia é intrínseca à foliação (principalmente à xistosidade). Em relação a resistência ao cisalhamento, esta tende a ser maior na direção oblíqua à foliação do que quando paralela à foliação. O comportamento esperado para a anisotropia da resistência ao cisalhamento foi o principal fator considerado para o planejamento das campanhas de laboratório. A anisotropia tem ainda uma forte tendência de ser determinante sempre que o

maciço rochoso for representado pela classe VI, devido a ação de um intenso intemperismo;

- (xii) Instabilidades locais foram detectadas na região norte devido ao intenso intemperismo dos materiais, associadas às condições críticas do nível d'água local (elevado grau de saturação e surgências de água). As instabilidades ocorreram entre as seções 646000 e 646800E, devido a influência do filito alterado com o mecanismo instalado de ruptura (a trinca conforme já se fez referência previamente). Nas seções 646800 e 647300E, a principal condicionante de instabilização se deve ao corpo de talco dentro da Formação Ferrífera.

5.4 – Seções de Referência e Condições de NA Adotadas para as Análises

Com base nos condicionantes anteriores, foram adotadas cinco seções de referência neste trabalho, para abordagens determinísticas e probabilísticas da estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco. Por representar o espectro das feições mais representativas do meio físico local, foram escolhidas as seções designadas como 646806, 646706, 647056, 646630 e 646406 (Figura 5.3).

Por outro lado, em função da relevância dos condicionantes hidrogeológicos sobre as análises de estabilidade, em função da natureza e interação entre os aquíferos presentes na área da cava da mina, foram adotados diferentes cenários de análise (Tabela 5.4), visando, além de quantificar as condições atuais, inferir comportamentos para condições futuras em face da reestruturação de planejamentos de lavra ora em andamento pela CVRD.

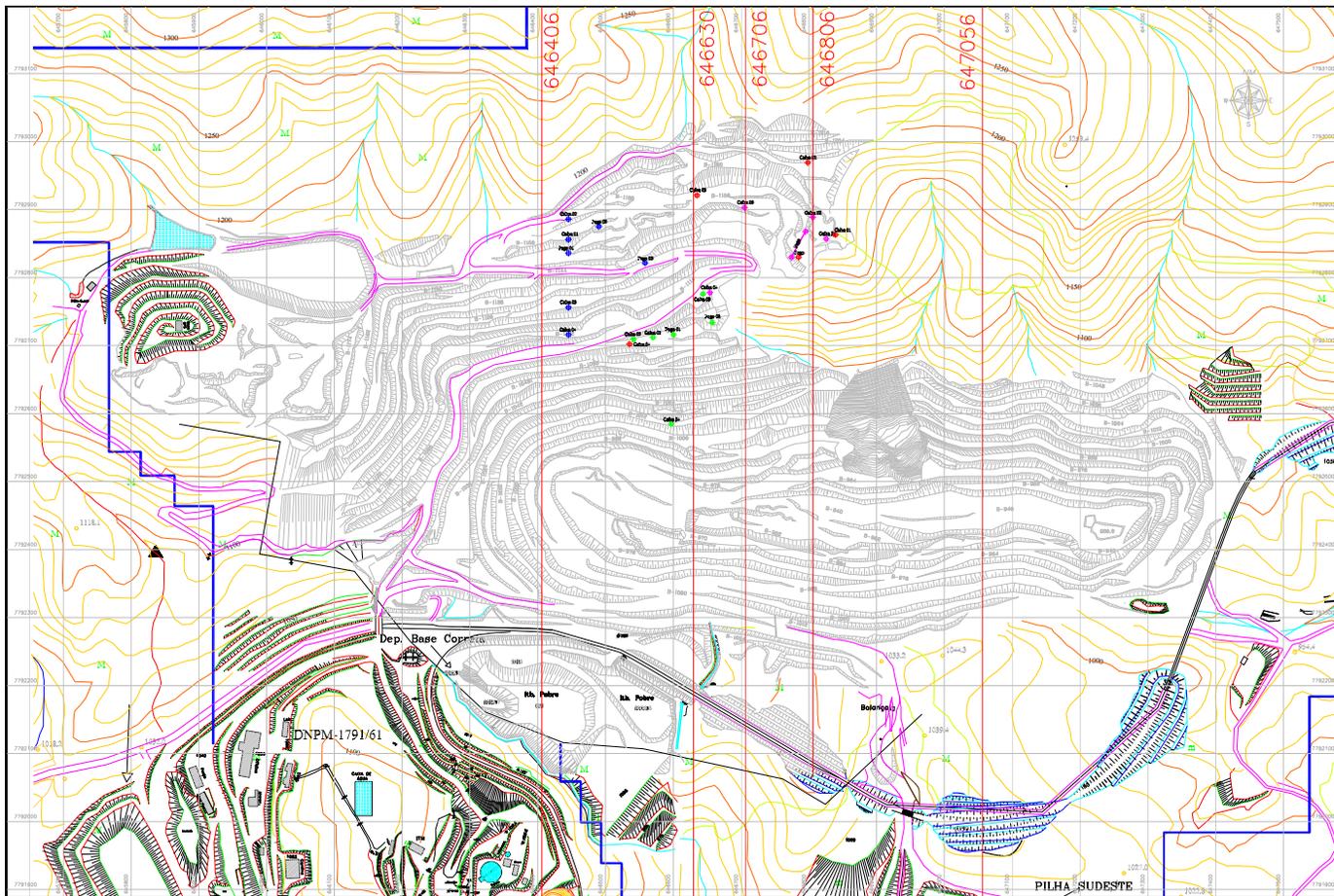


Fig. 5.3 – Localização das seções de referência adotadas nas análises da estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco

Tabela 5.4 - Condições de água nos taludes da Mina de Gongo Soco

Cenário do Nível D'água	Descrição	Comentário
Nível Atual	O nível d'água alcança o equilíbrio na maior parte dos taludes da mina menos nas regiões mais elevadas.	Cenário atual. Representa a condição mais crítica.
Drenado	Superfície de deslizamento acima do nível d'água. Cisalhamento sob condições drenadas.	Cenário teórico, como proposta para estudar a sensibilidade das análises.
Parcialmente Drenado	Superfície de deslizamento abaixo do nível d'água, mas o NA atinge o equilíbrio entre a escavação do talude e a superfície de deslizamento.	Cenário teórico possível de ocorrer com a implantação de um sistema de despressurização do NA no Grupo Nova Lima e nas Formações Moeda e Batatal.

5.5 – Parâmetros Geotécnicos Adotados

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento, para as análises de estabilidade realizadas ao longo das seções escolhidas, foram estabelecidos primariamente com base nos resultados dos ensaios de laboratório realizados e a partir de retroanálises de algumas rupturas de taludes da cava. Ainda assim, estas fontes foram insuficientes para obtenção dos parâmetros relativos a todas as litologias intervenientes nas seções-tipo analisadas.

Neste sentido, impôs-se a necessidade de um levantamento complementar de dados sobre parâmetros de resistência de litologias típicas da coluna estratigráfica do Quadrilátero de Minas Gerais. Trata-se de um banco de dados bastante amplo, muitas vezes com dados não publicados, que foram sendo gerados em projetos de diferentes minas implantadas nesta região. Com as devidas cautelas, mas levando-se em conta a similaridade das características geológicas regionais, foram compilados os dados indicados nas tabelas 5.5 e 5.6 a seguir.

Tabela 5.5 – Resultados de Ensaios CD em litologias típicas do QF de Minas Gerais

Amostra	Umidade (%)		Índice de Vazios	Grau de Saturação (%)	Foliação	C' (kPa)	ϕ' (graus)	C_r (kPa)	ϕ_r (graus)
Filito Piracicaba IV	Natural	12,00	0,50	55	Paralela	33	24,7	5	22,3
	(saturada)	14,00	0,50	90	Paralela	0	19,3	0	19,0
		6,00	0,45	38	Normal	60	31,3	40	31,0
Quartzito Piracicaba Cinza VI	Natural	2,50	0,37	20	Paralela	70	41,7	30	34,0
	(saturada)	13,00	0,36	95	Paralela	70	46,0	40	46,0
Quartzito Piracicaba Vermelho VI	Natural	7,00	0,45	39	Normal	50	41,2	45	41,0
	(saturada)	20,00	0,34 a 0,64	100	Paralela	25	29,9	20	29,0

Tabela 5.6 – Resultados de Ensaios triaxiais em litologias típicas do QF de Minas Gerais

Amostra	Umidade (%)		Índice de Vazios	Grau de Saturação (%)	Foliação	C' (kPa)	ϕ' (graus)	C_r (kPa)	ϕ_r (graus)
Filito Piracicaba IV	Saturado	15,00	0,46	96	Horizontal	0	19,3	0	16,0
	Saturado	16,00	0,48	96	Inclinada	0	18,2	0	18,0
	Natural	9,00	0,42	55	Horizontal	20	27,7	-	-
	Natural	10,00	0,45	70	Inclinada	30	18,0	-	-
Quartzito Piracicaba Cinza VI	Natural	20,00	0,40	20	Horizontal	130	58,5	50	44,0
	Natural	3,50	0,35	30	Inclinada	200	42,0	50	38,0
Quartzito Piracicaba Vermelho VI	Natural	10,00	0,50	20	Horizontal	0	35,5	0	30,0
	Natural	8,00	0,45	25	Inclinada	40	34,0	20	32,0
	Natural	10,00	0,45	45	Inclinada	0	43,0	0	30,0
Xisto IV	Natural	29,00	0,90	90	Horizontal	90	27,0	60	26,0
	Natural	28,00	0,85	80	Inclinada	70	22,7	50	18,0
	Natural	7,00	0,39	50	Horizontal	150	41,2	80	30,0
	Natural	7,00	0,40	45	Inclinada	70	33,7	40	26,0

Adicionalmente, foram realizadas medidas de inclinações de bancadas de 12m de altura da mina, com base em dados topográficos e compreendendo o conjunto das litologias típicas da cava (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Ângulos de bancadas dos taludes de Mina de Gongo Soco

Litologia	Material	Ângulo da bancada
Filito	solo	29°
Xisto Nova Lima	solo	30°
Itabirito Friável	solo	28°
Itabirito carbonático	solo	28 a 38°
Itabirito dolomítico	solo	35°
Hematita pulverulenta	solo	40°
Hematita friável	solo	30 a 32°
Quartzito	rocha	45 a 48°
Talco (retroanálise)	solo	18° (c = 0)

A análise criteriosa dos dados disponíveis, em termos de parâmetros de resistência das litologias compreendidas nas diferentes seções de referência consideradas, conduziu aos dados propostos na Tabela 5.8, para as análises de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco. Os valores mais baixos referem-se à condição de superfícies de ruptura condicionadas pela xistosidade e/ou estratificação do maciço os valores maiores são característicos para mecanismos de ruptura envolvendo superfícies truncando estes planos de estratificação e/ou xistosidade.

Estas análises incorporaram importantes aspectos do detalhamento do modelo geológico da área da cava. Note-se, por exemplo, que foram distinguidas três diferentes tipos de hematita (pulverulenta, friável e talcosa) e dois tipos de itabiritos: dolomíticos e os itabiritos friáveis, para os quais os parâmetros de resistência somente puderam ser estabelecidos a partir de amostras moldadas.

Nesta sistematização dos dados, foram incluídos também os valores dos pesos específicos correspondentes aos diferentes materiais, vinculando-se uma descrição mais genérica das litologias com a nomenclatura abreviada utilizada para a sua identificação, associada à respectiva classe geomecânica da mesma.

Tabela 5.8 – Parâmetros geotécnicos adotados para as análises de estabilidade

Litologia	γ	Paralelo à foliação		Perpendicular à foliação		Descrição
		<i>c</i>	ϕ	<i>c</i>	ϕ	
QM VI	22	20	32	30	36	Quartzito solo
QM III	25	800	36	2000	40	Quartzito rocha alterado
QM II	25	1200	42	5000	45	Quartzito rocha
IF IV	28	70	38	100	40	Itabirito rocha alterado
IF V	26	50	35	80	36	Itabirito rocha muito alterado
IF VI	24	30	32	30	32	Itabirito solo
IBC IV	22	20	37	40	37	Itabirito dolomítico rocha alterado
IBC VI	20	25	36	25	36	Itabirito dolomítico solo
IB V	26	50	38	80	40	Hematita Pulverulenta
IB VI (HF VI)	26	80	35	120	35	Hematita Friável
XNL II	22	400	35	1000	36	Xisto rocha
XNL VI	18	50	20	100	25	Xisto solo
UT VI	20	20	30	20	35	Unidade Transicional
G VI	20	20	30	20	35	Dolomito solo
FB VI	18	0	25	40	28	Filito solo
HMTX	18	0	18			

Unidades - *c*(Kpa) - γ (kN/m³) - ϕ (graus)

Capítulo 6

Análises Determinísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco

6.1 – Introdução

As atividades de lavra encontram-se historicamente vinculadas aos indicadores de produção prevista num dado empreendimento mineral. Assim, o princípio geral é o do processo de lavra se adequar às demandas, conformando diferentes frentes de lavra no âmbito da cava. Este processo está fundamentado em premissas econômicas, particularmente em termos da relação estéril / minério, ou seja, quanto menor for a quantidade de estéril a ser removida para a extração de uma certa quantidade de minério, mais lucrativa é a atividade de lavra. Entretanto, esta abordagem é fortemente condicionada pelos aspectos geológico-geotécnicos dos taludes da cava.

No caso da Mina de Gongo Soco, estes condicionantes são muitos e complexos. As litologias presentes são variadas, as feições estruturais relevantes também são variadas bem como as características hidrogeológicas locais. Neste sentido, as análises de estabilidade, para incorporar esta complexidade de fatores, devem ser precedidas de estudos detalhados para formulação de critérios e dos parâmetros geotécnicos de projeto (Capítulo 5). Conforme salientado previamente, estes valores foram estabelecidos a partir da síntese de dados oriundos de investigações de laboratório e de campo na própria mina e por correlações com dados de minas similares.

Neste capítulo, são apresentados os resultados das análises preliminares dos taludes da cava, utilizando abordagens determinísticas e, assim, admitindo valores constantes para os parâmetros das diferentes litologias típicas da área. O presente estudo está focado na avaliação da estabilidade global dos taludes, o que exclui o dimensionamento de ângulos, bermas, altura de bancadas e outros aspectos ligados a potenciais condições de instabilidades localizadas dos maciços da cava.

Neste sentido, foram realizadas análises de estabilidade para cinco seções representativas dos taludes, admitindo três diferentes hipóteses em relação às condições de água nos maciços e considerando superfícies de ruptura circulares. Nas análises, foram utilizados os métodos de Bishop Modificado e Janbu Modificado (não rigorosos) e o método de Spencer (rigoroso) pela aplicação do software Slope/W.

As hipóteses de posição do NA nos taludes adotadas nas análises foram as seguintes:

- Talude saturado (profundidade do nível d'água variando de 20 a 30 m): situação mais representativa da condição atual dos taludes;
- Talude parcialmente drenado (profundidade do nível d'água a 40 m): visando estudar a influência de processos de rebaixamento do nível d'água nos valores dos fatores de segurança dos taludes;
- Talude drenado (Profundidade do nível d'água a 100 m): condição idealizada e passível de ser obtida por um amplo programa de rebaixamento de despressurização dos maciços da cava.

6.2 – Análises de Estabilidade

As análises de estabilidade foram realizadas para as seções 646806, 646706, 647056, 646630 e 646406 (Figura 5.3), admitidas como as mais representativas para a aferição das condições de estabilidade dos taludes das paredes norte e sul.

Inicialmente, procedeu-se a uma avaliação global das seções utilizando a metodologia implementada através da planilha determinística apresentada no capítulo 3 (seção 3.3.1), com FS estimado para mecanismos de ruptura circular quantificados com base no método de Janbu Modificado. As figuras 6.1 a 6.3 mostram os resultados obtidos para o caso da seção 646406, considerando três condições de piezometria distintas (NA a 20, 40 e 100 m de profundidade, respectivamente).

<i>Fatia</i>	<i>Tan α</i>	<i>ΔX</i>	<i>p</i>	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>Tan φ</i>	<i>ΔQ</i>	<i>h_i</i> 0	<i>Tan α_i</i>	
1	1,225	59	61,55	4,2	4	0,532	0	15,63	0,609	
2	0,777	36	103,42	27,9	4	0,532	0	20,93	0,802	
3	0,629	13	112,34	30,3	4	0,532	0	18,97	0,329	
4	0,509	36	134,79	32,9	4	0,532	0	26,03	0,409	FS 1,167
5	0,324	54	151,61	31,22	4	0,532	0	20,62	0,443	
6	0,217	4,24	136,37	27,86	4	0,532	0	20,15	0,305	
7	0,132	45,93	112,92	19,38	2,5	0,726	0	12,24	0,25	
8	0,021	21,83	71,51	5,55	3	0,625	0	7,6	0,119	
9	-0,039	15	44,31	0	3	0,625	0	4,45	0,141	
10	-0,095	19	19,74	0	3	0,625	0	0	-	

<i>Fatia</i>	<i>B</i>	<i>A'</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>ΔE</i>	<i>E</i> 0	<i>ΔE/ΔX</i>	<i>T</i> 0	<i>ΔT</i>	<i>t</i>	<i>τ</i>	<i>σ'</i>
1	4448,526	2036,102	0,623	3266,906	1648,740	1648,740	30,817	0,000	0,000	0,000	18,977	34,103
2	2892,864	1590,359	0,844	1883,321	1278,830	2927,570	33,096	0,000	0,000	0,000	27,956	53,798
3	918,604	619,389	0,922	671,788	342,872	3270,442	19,951	0,000	0,000	0,000	31,732	62,080
4	2469,892	2095,397	0,979	2141,336	634,735	3905,177	2,838	0,000	0,000	0,000	40,487	81,282
5	2652,569	3674,564	1,039	3537,708	-379,299	3525,878	-8,028	0,000	0,000	0,000	50,812	103,927
6	125,471	261,724	1,050	249,376	-88,247	3437,631	-40,053	0,000	0,000	0,000	48,139	98,064
7	684,607	3233,933	1,064	3040,562	-1921,199	1516,432	-39,949	0,000	0,000	0,000	55,763	86,179
8	32,782	965,432	1,011	955,114	-785,764	730,668	-32,997	0,000	0,000	0,000	37,480	65,173
9	-25,921	460,406	0,978	470,944	-429,528	301,140	-21,490	0,000	0,000	0,000	26,866	45,358
10	-35,631	291,413	0,941	309,807	-301,140	0	-15,849	0	0,000	0,000	13,849	21,056
	14163,764			16526,863								

Figura 6.1: Cálculo do FS (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 20 m de profundidade através da planilha

<i>Fatia</i>	<i>Tan α</i>	ΔX	<i>p</i>	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>Tan φ</i>	ΔQ	h_i 0	<i>Tan α_i</i>
1	1,43	47	44,92	0	4	0,532	0	13,07	0,705
2	0,89	36	93,66	2,8	4	0,532	0	19,09	0,832
3	0,7	13	106,65	7,6	4	0,532	0	18,17	0,355
4	0,56	36	131,86	10,7	4	0,532	0	25,43	0,437
5	0,35	54	151,67	10,7	4	0,532	0	21,07	0,404
6	0,23	5,19	136,97	8,26	4	0,532	0	20,24	0,309
7	0,13	46,1	113,39	0	2,5	0,726	0	12,24	0,221
8	0,01	20,7	73,3	0	3	0,625	0	7,64	0,148
9	-0,05	15	45,47	0	3	0,625	0	4,77	0,104
10	-0,11	19	20,23	0	3	0,625	0	0	-

<i>Fatia</i>	<i>B</i>	<i>A'</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	ΔE	<i>E</i> 0	$\Delta E/\Delta X$	<i>T</i> 0	ΔT	<i>t</i>	τ	σ'
1	3019,073	1311,180	0,505	2595,526	1182,903	1182,903	28,848	0,000	0,000	0,000	12,830	26,572
2	3000,866	1884,151	0,745	2529,359	1211,504	2394,407	31,982	0,000	0,000	0,000	27,735	66,176
3	970,515	737,030	0,848	869,187	355,620	2750,027	22,906	0,000	0,000	0,000	31,745	76,829
4	2658,298	2464,456	0,922	2673,784	766,764	3516,791	7,113	0,000	0,000	0,000	39,999	98,761
5	2866,563	4265,786	1,008	4231,016	-126,613	3390,178	-3,733	0,000	0,000	0,000	49,380	123,687
6	163,501	376,139	1,032	364,486	-94,350	3295,828	-40,003	0,000	0,000	0,000	47,186	117,857
7	679,546	3910,255	1,049	3727,463	-1957,398	1338,430	-39,730	0,000	0,000	0,000	56,250	106,078
8	15,173	1010,419	1,004	1006,071	-696,559	641,871	-30,041	0,000	0,000	0,000	34,380	72,956
9	-34,103	471,281	0,975	483,140	-375,894	265,977	-18,879	0,000	0,000	0,000	22,729	46,606
10	-42,281	297,231	0,940	316,207	-265,977	0	-13,999	0	0,000	0,000	11,633	21,510
	13297,152			18796,240								

FS 1,414

Figura 6.2: Cálculo do FS (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 40 m de profundidade através da planilha

<i>Fatia</i>	<i>Tan α</i>	ΔX	<i>p</i>	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>Tan φ</i>	ΔQ	h_t 0	<i>Tan α_t</i>
1	2,010	22,910	35,010	0	4	0,532	0	10,77	0,9
2	1,180	36,000	92,790	0	4	0,532	0	21,13	0,93
3	0,856	13,000	114,910	0	4	0,532	0	20	0,41
4	0,648	36,000	145,180	0	4	0,532	0	28,4	0,451
5	0,367	54,000	168,800	0	4	0,532	0	24,07	0,33
6	0,182	19,440	148,650	0	4	0,532	0	21,11	0,247
7	0,041	42,530	117,000	0	2,5	0,726	0	12,2	0,174
8	-0,075	10,030	80,710	0	3	0,625	0	9,85	0,079
9	-0,132	15,000	60,060	0	3	0,625	0	6,61	-0,052
10	-0,211	19,000	31,240	0	3	0,625	0	0	-

<i>Fatia</i>	<i>B</i>	<i>A'</i>	<i>n</i>	<i>A</i>	ΔE	<i>E</i> 0	$\Delta E/\Delta X$	<i>T</i> 0	ΔT	<i>t</i>	τ	σ'
1	1612,179	518,346	0,338	1535,397	604,885	604,885	40,925	0,000	0,000	0,000	8,724	17,476
2	3941,719	1921,114	0,590	3255,377	1806,036	2410,921	47,830	0,000	0,000	0,000	24,797	63,529
3	1278,718	846,718	0,750	1129,646	537,616	2948,537	34,747	0,000	0,000	0,000	32,900	86,747
4	3386,759	2924,487	0,864	3386,573	1165,005	4113,542	12,975	0,000	0,000	0,000	43,464	117,015
5	3345,278	5065,286	0,994	5094,919	2,767	4116,309	-6,816	0,000	0,000	0,000	54,551	148,780
6	525,936	1615,110	1,029	1568,948	-503,369	3612,940	-43,512	0,000	0,000	0,000	51,250	139,322
7	204,016	3718,908	1,018	3653,808	-2193,057	1419,883	-49,822	0,000	0,000	0,000	56,267	114,693
8	-60,714	536,041	0,964	556,159	-425,581	994,301	-38,897	0,000	0,000	0,000	36,174	83,423
9	-118,919	608,063	0,930	654,058	-548,012	446,289	-29,244	0,000	0,000	0,000	28,116	63,771
10	-125,241	427,975	0,875	489,367	-446,289	0	-23,489	0	0,000	0,000	16,177	34,653
	13989,732			21324,252								

FS 1,524

Figura 6.3: Cálculo do FS (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 100 m de profundidade através da planilha

As figuras 6.4 a 6.6 apresentam os resultados destas mesmas análises de estabilidade implementadas através do Programa SLOPE/W.

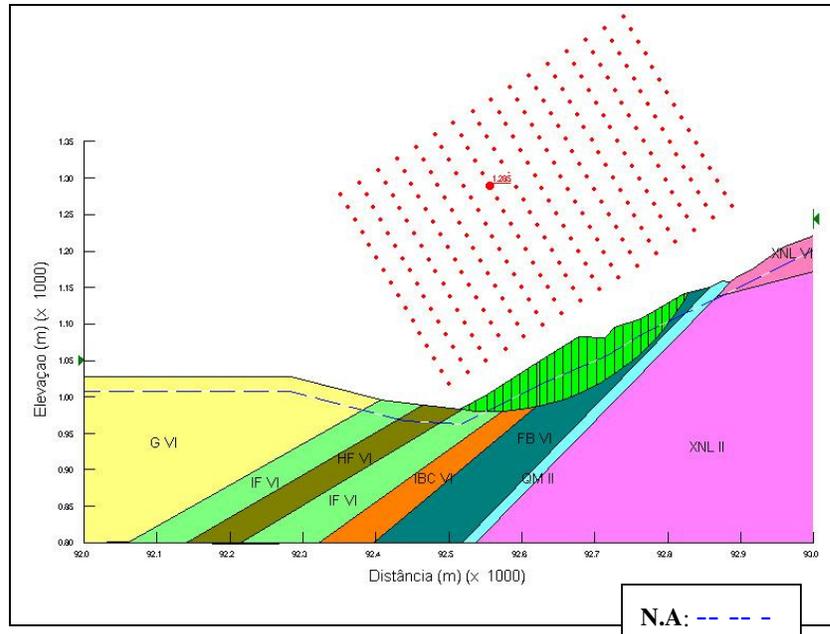


Figura 6.4 - Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 20m

G VI: Dolomito Gandarela (Classe VI);	IF VI: Itabirito Friável (Classe VI)
HF VI: Hematita friável (Classe VI);	IBC VI: Itabirito Carbonático (Classe VI)
FB VI: Filito Batatal (Classe VI);	QM II: Quartzito Moeda (Classe II)
XNL VI: Xisto Nova Lima (Classe VI);	XNL II: Xisto Nova Lima (Classe II)

No primeiro caso (N.A. a 20m de profundidade) e utilizando o método de Spencer, foi obtido um fator de segurança da ordem de 1,29, no limite da aceitação para taludes de mineração ($FS \geq 1,30$). A massa de solo potencialmente instável ficou limitada a três litologias básicas: o filito Batatal e os itabiritos carbonático e friável (ambos classe VI). A superfície circular de ruptura é condicionada pela atitude do Filito Batatal ao longo de grande parte de sua extensão, truncando na base ambos os itabiritos. Neste contexto, foram adotados, para as litologias envolvidas, parâmetros de resistência característicos das condições do mecanismo de ruptura analisado, ou seja, tomados paralelamente à foliação para o filito Batatal e perpendicular à foliação para os itabiritos.

Para a condição parcialmente drenada do maciço (rebaixamento do nível d'água para 40 metros), o fator de segurança do talude passou de 1,29 para 1.55 (Figura 6.5), um acréscimo de cerca de 20% com relação à situação anterior.

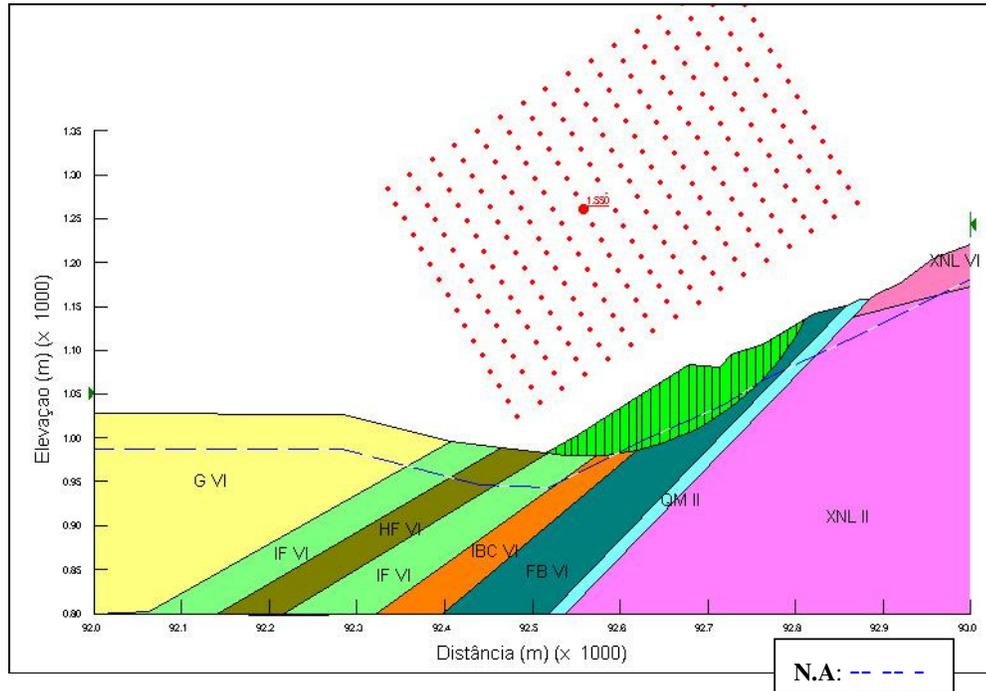


Figura 6.5 - Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 40m

Para um rebaixamento de grande porte (N.A. a 100 m de profundidade), o fator de segurança passou a ser de 1,77 (Figura 6.6). Também nestas condições, a superfície de ruptura ficou condicionada pelas três litologias identificadas previamente, tendendo, porém, a se afastar cada vez mais da interface com o quartzito Moeda com o crescente rebaixamento do N.A.

Estes resultados demonstram claramente a especial relevância que tem as condições hidrogeológicas na estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco, condicionada, em larga escala, por uma manutenção forçada das águas subterrâneas em níveis profundos nos maciços. Conclusões similares podem ser extrapoladas a quaisquer outras das seções analisadas.

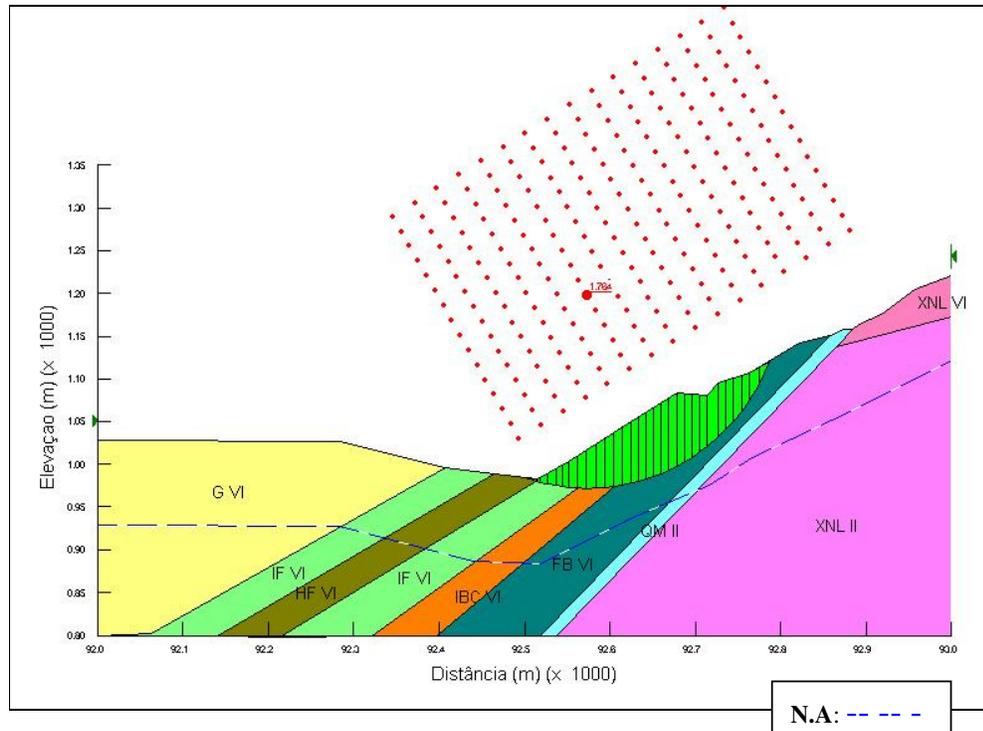


Figura 6.6 - Análise de estabilidade da seção 646406 para a condição NA a 100m

Para efeito de comparação, os resultados das análises obtidos via planilha e programa comercial (para 10 e 30 fatias, respectivamente), em termos dos valores globais de FS, são apresentados na Tabela 6.1, ratificando o potencial de utilização da planilha em análises formais.

Tabela 6.1: Resultados das análises determinísticas de estabilidade da seção 646406 (diferentes posições do NA) através do software SLOPE/W e da planilha eletrônica

Seção 646406 - Método de análise: Janbu Simplificado

Prof. NA	Ferramenta análise	Núm. Fatias	F.S.
20 m	SLOPE/W	30	1,14
	SLOPE/W	10	1,11
	Planilha	10	1,17
40 m	SLOPE/W	30	1,36
	SLOPE/W	10	1,33
	Planilha	10	1,41
100 m	SLOPE/W	30	1,53
	SLOPE/W	10	1,50
	Planilha	10	1,52

Os resultados de todas as análises determinísticas implementadas para as seções de referência dos taludes da Mina de Gongo Soco estão sistematizados na Tabela 6.2, com base em valores de FS por diferentes métodos (utilizando o software Slope/W) e na geometria global da superfície crítica de ruptura.

Tabela 6.2 – Resultados de análises de estabilidade (taludes da Mina de Gongo Soco)

Seção	Nível NA	Fator de Segurança			Superf. Ruptura (cotas m)		
		Bishop	Spencer	Janbu	Entrada	Saída	Profundidade
646806	30	1.12	1.18	0.98	1123	943	77
	40	1.24	1.30	1.09	1124	944	77
	100	1.39	1.43	1.29	1123	942	56
646406	20	1.26	1.29	1.14	1146	983	74
	40	1.48	1.55	1.36	1146	983	74
	100	1.74	1.77	1.53	1143	985	65
646706	20	1.11	1.16	1.01	1145	965	72
	40	1.38	1.44	1.22	1146	965	66
	100	1.54	1.55	1.40	1122	965	38
647056	20	1.22	1.26	1.15	1140	948	66
	40	1.45	1.49	1.37	1141	946	66
	100	1.50	1.52	1.45	1138	990	42
646630	20	1.26	1.31	1.12	1120	977	69
	40	1.47	1.56	1.34	1120	979	52
	100	1.55	1.57	1.45	1121	977	42

Os dados permitem ter uma noção da magnitude geométrica das rupturas potenciais dos taludes para as diferentes condições consideradas, expressas em termos da altura média da massa de material instável e pela locação dos pontos de entrada e saída da superfície potencial de ruptura no corpo do talude.

Incorporando a síntese criteriosa e abrangente dos parâmetros geotécnicos de referência para as análises de estabilidade e o maior detalhamento das feições geológicas da cava, realizadas neste estudo, constata-se que os taludes da Mina de Gongo Soco mostram-se mais estáveis do que os resultados obtidos nas análises prévias (Innocentini, 2003). Ainda assim, ratificam os problemas de estabilidade para uma hipótese de continuidade normal da lavra dentro dos padrões até então vigentes, sendo bastante expressivos sobre a influência dos condicionantes hidrogeológicos da área. Para atendimento pleno aos requisitos de segurança, é fundamental a implantação de um sistema de drenagem profunda específico para o controle das pressões hidrostáticas no maciço encaixante.

6.3 – Análises de Estabilidade dos Taludes sob Desmonte por Explosivos

No processo de desmonte de lavra da Mina de Gongo Soco, mais de 90% das operações são feitas com utilização de explosivos, sendo os efeitos destas detonações usualmente desconsiderados em análises convencionais de estabilidade de taludes de mineração. Isto decorre principalmente em função de que os planos de fogo não induzem uma força de aceleração constante atuando na massa de solo potencialmente instável, devido ao fato de que as altas frequências geradas pela detonação não conseguem solicitar grandes volumes em fase.

No caso da mina, as frequências predominantes estão situadas, para as distâncias entre a detonação da lavra e o centro de gravidade da massa a escorregar, em faixas inferiores a 13 Hz, ou seja, em frequências médias a baixas. Os estudos das acelerações prováveis mostraram que, para cargas por espera entre 60 e 100 kg e distâncias entre 100 e 200 m, as acelerações são da ordem de 0,05 g para desmontes bem planejados, podendo chegar a 0,12 g para desmontes engastados, com má utilização dos explosivos e plano de fogo mal dimensionado (Innocentini, 2003).

Deste modo, os estudos de estabilidade dos taludes da mina de Gongo Soco incluíram análises pseudo-estáticas das condições avaliadas previamente, através de simulações para as seções analisadas dos efeitos de detonações em condições de desmontes bem e mal dimensionadas. Foram consideradas as mesmas situações de variação do lençol freático nos maciços adotadas anteriormente.

A tabela 6.3 apresenta os resultados das análises de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco, para condições estáticas e pseudo-estáticas, considerando neste caso a influência dos processos de desmonte por explosivos (mobilização de solicitações correspondentes a acelerações horizontais iguais a 0,05 g e 0,12 g). A conclusão geral é que os coeficientes de segurança estáticos são reduzidos da ordem de 10% quando os taludes são reanalisados sob a influência de fogos bem dimensionados (aceleração igual a 0,05 g) e da ordem de 20%, quando reanalisados para fogos mal dimensionados (aceleração igual a 0,12 g).

Tabela 6.3 – Resultados das análises pseudo-estáticas (taludes da Mina de Gongo Soco)

Seção	Condição	NA (m)	Para a = 0 g			Para a = 0.05 g			Para a = 0.12 g		
			B	S	J	B	S	J	B	S	J
646806	Atual	30	1.12	1.18	0.98	1.00	1.06	0.87	0.87	0.93	0.75
	Variando	40	1.24	1.30	1.09	1.11	1.17	0.97	0.96	1.03	0.84
	NA	100	1.39	1.43	1.29	1.24	1.28	1.14	1.06	1.12	0.98
646406	Atual	20	1.26	1.29	1.14	1.12	1.15	1.01	0.96	1.00	0.86
	Variando	40	1.48	1.55	1.36	1.33	1.36	1.20	1.15	1.18	1.03
	NA	100	1.74	1.77	1.53	1.34	1.36	1.25	1.15	1.18	1.09
646706	Atual	20	1.11	1.16	1.01	0.98	1.03	0.89	0.83	0.89	0.75
	Variando	40	1.38	1.44	1.22	1.22	1.29	1.08	1.05	1.12	0.93
	NA	100	1.54	1.55	1.40	1.36	1.40	1.25	1.17	1.21	1.07
647056	Atual	20	1.22	1.26	1.15	1.07	1.11	1.00	0.91	0.95	0.85
	Variando	40	1.45	1.49	1.37	1.28	1.31	1.20	1.09	1.13	1.02
	NA	100	1.50	1.52	1.45	1.32	1.34	1.28	1.12	1.15	1.08
646630	Atual	20	1.26	1.31	1.12	1.13	1.17	0.99	0.96	0.99	0.84
	Variando	40	1.47	1.56	1.34	1.37	1.39	1.24	1.18	1.21	1.07
	NA	100	1.55	1.57	1.45	1.39	1.41	1.30	1.19	1.21	1.12

B: método de Bishop Modificado; S: método de Spencer, J: método de Janbu Modificado.

Capítulo 7

Análises Probabilísticas dos Taludes da Mina de Gongo Soco

7.1 – Introdução

A estabilidade de um talude não está relacionada somente com o equilíbrio de forças atuantes no mesmo. Dois taludes que apresentem um mesmo fator de segurança (FS) não estão, necessariamente, sujeitos às mesmas condições de estabilidade. O conceito de estabilidade está, também, intimamente ligado à variabilidade existente nos parâmetros geotécnicos dos diversos tipos de solos presentes nestes taludes. Uma maior variabilidade destes parâmetros sugere um menor índice de confiabilidade do sistema e, conseqüentemente, uma maior probabilidade de falha. Deste modo, dois taludes que apresentem um mesmo fator de segurança (FS) podem apresentar probabilidades de ruptura distintas, dependendo da variabilidade existentes nos parâmetros considerados nas análises.

A variabilidade dos parâmetros citada está ligada às análises estatísticas realizadas sobre os resultados de ensaios de laboratório e de campo (dados amostrais), aos quais são submetidos as amostras (físicas) dos tipos de solos presentes no problema em questão. Neste trabalho, esta variabilidade é expressa sob a forma dos desvios padrão obtidos para os parâmetros de análise, determinados com base nos resultados dos ensaios feitos sobre as litologias presentes nos taludes da Mina de Gongo Soco. Torna-se, deste modo, de fundamental importância, proceder à caracterização das faixas de variabilidade destes parâmetros para todos os tipos de solo presentes nos maciços.

O principal objetivo deste capítulo é avaliar a confiabilidade dos taludes citados. Este tipo de estudo gera informações capazes de incrementar os resultados das análises determinísticas obtidas anteriormente. Os valores dos índices de confiabilidade (β), utilizados juntamente com os valores dos fatores de segurança determinísticos (FS),

asseguram uma avaliação mais abrangente e mais consistente das condições efetivas da estabilidade dos taludes estudados.

Duas ferramentas distintas foram utilizadas nesta avaliação: (i) a análise de confiabilidade dos taludes da seção 646406 levando-se em conta os três níveis piezométricos considerados (20, 40 e 100 m) é feita segundo o procedimento proposto por Low & Tang (1997); (ii) análises feitas através do programa SLOPE/W, para fins de comparação.

A partir destes resultados, é possível estender a análise para todas as outras seções da mina consideradas anteriormente (capítulo 5), programa de extensão ora em andamento no contexto do convênio da UFOP com a CVRD, e que não serão tratadas de forma generalizada no presente trabalho.

7.2 – Parâmetros Utilizados nas Análises de Confiabilidade

Os parâmetros utilizados nas análises de confiabilidade foram obtidos através de faixas de variância de parâmetros, como o ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c), apresentadas em vários trabalhos. Dell'Avanzi (1995) faz a análise da confiabilidade da Barragem de Santa Branca utilizando para a coesão (c) um coeficiente de variação de 20% e para o ângulo de atrito (ϕ) um coeficiente de variação de 5%. Assis (2003) apresenta faixas de valores típicos de coeficientes de variação para os parâmetros-índices em análises de estabilidade (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 – Valores típicos do coeficiente de variação

<i>Parâmetro</i>	<i>Coefficientes de Variação (%)</i>
Peso específico	03 (02 a 08)
Coesão	40 (20 a 80)
Ângulo de atrito efetivo	10 (04 a 20)
Resistência não-drenada	30 (20 a 50)

No presente caso, os dados da Tabela 5.8 evidenciam dispersões de valores muito além destes limites de referência, particularmente em termos das variações dos valores de

coesão dos diferentes materiais. Levando-se em conta os resultados dos ensaios realizados para as litologias específicas atravessadas pela superfície de ruptura crítica correspondente à seção-tipo analisadas dos taludes, foram definidos os seguintes valores do coeficientes de variação: $CV(c) = 90\%$ e $CV(\phi) = 5\%$. Nas análises feitas através do software SLOPE/W, foram utilizados os valores da tabela 5.8 como valores médios das variáveis aleatórias consideradas na análise. Apresentam-se, nas próximas seções, os resultados obtidos para as análises de confiabilidade da seção 646406 considerando-se três níveis de piezometria (20, 40 e 100 m) e os coeficientes de variação supracitados.

Na análise de confiabilidade através da planilha proposta por Low & Tang (1997), utilizam-se valores médios para os parâmetros geotécnicos considerados. No caso das seções analisadas, para os valores médios destes parâmetros, estabeleceu-se uma média ponderada considerando a superfície de ruptura determinística fornecida pelo software SLOPE/W. Consideraram-se as litologias cortadas por esta superfície e a extensão de cada uma delas no domínio de cada litologia presente. A superfície de ruptura crítica corta as seguintes litologias (Figura 7.1): Itabirito-solo (IF VI), Itabirito Dolomítico-solo (IBC VI) e Filito-solo (FB VI), condição válida para qualquer uma das piezometrias consideradas.

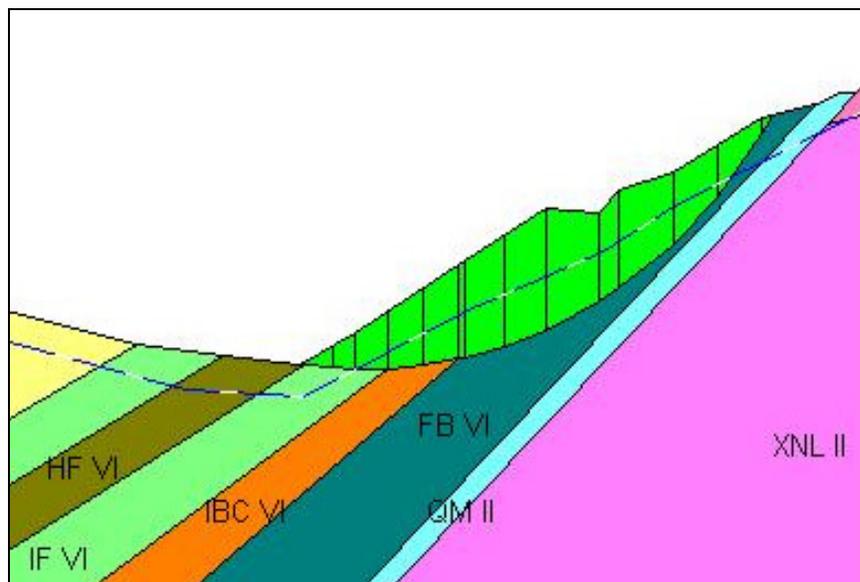


Figura 7.1: Superfície de ruptura e litologias atravessadas (seção 646406 NA 20m)

O cálculo das médias ponderadas dos parâmetros foi feito da seguinte maneira:

$$\bullet \quad \bar{X} = \frac{(X1 * Dist1) + (X2 * Dist2) + \dots + (Xn + Distn)}{Dist_{TOTAL}}$$

sendo:

\bar{X} - Valor médio do parâmetro considerado (c ou ϕ);

X_i - Valor do parâmetro (c ou ϕ) na i-ésima cortada pela superfície de ruptura;

$Dist_i$ - extensão do domínio da i-ésima litologia ao longo da superfície de ruptura;

$Dist_{TOTAL}$ - Comprimento total da superfície de ruptura

Para o caso da seção 646406 e dos solos cortados pela superfície de ruptura considerada na figura 7.1, os valores dos parâmetros foram:

- $c_{FBVI} = 4 \text{ kPa}$,
- $c_{BCVI} = 2,5 \text{ kPa}$
- $c_{FVI} = 3 \text{ kPa}$

- $Dist_{FBVI} = 244,51 \text{ m}$
- $Dist_{BCVI} = 42,568 \text{ m}$
- $Dist_{FVI} = 47,708 \text{ m}$

- $\phi_{FBVI} = 28^\circ$
- $\phi_{BCVI} = 36^\circ$
- $\phi_{FVI} = 32^\circ$

Coesão média:

$$\bar{c} = \frac{(4 * 244,51) + (2,5 * 42,568) + (3 * 47,708)}{334,787} = 3,67 \text{ kPa}$$

Ângulo de atrito médio:

$$\bar{\phi} = \frac{(28 * 244,51) + (36 * 42,568) + (32 * 47,708)}{334,787} = 29,59^\circ$$

Considerando os valores de coeficientes de variação $CV(c) = 90\%$ e $CV(\phi) = 5\%$, os valores de desvios padrão utilizados para a análise de confiabilidade da seção 646406, considerando as três condições de piezometria adotadas, foram iguais a:

- $(c) = 3,3 \text{ kPa}$;
- $\sigma(\phi) = 1,48^\circ$.

7.3 – Análises de Confiabilidade dos Taludes

7.3.1 – Planilha Estatística – seção 646406

De acordo com o que foi descrito no item 3.5.2, foram feitas análises de confiabilidade para o talude da seção 646406 considerando três níveis piezométricos distintos, com NA a profundidades de 20, 40 e 100 m. Os resultados obtidos serão posteriormente comparados com os resultados obtidos pelo software SLOPE/W para os taludes nas mesmas condições.

A avaliação realizada através do procedimento proposto por Low & Tang (1997), conforme descrito no item 3.5.2, utiliza o método de Janbu Generalizado para as análises de estabilidade determinísticas dos taludes. Para tornar possível uma comparação com os resultados obtidos pelo software SLOPE/W, que apresenta a opção de análise de estabilidade pelo método de Janbu Modificado, este método foi implementado na planilha. Para isto, todos os valores dos dados correspondentes aos valores das componentes verticais das forças de interação entre as fatias foram zerados na coluna específica dos dados.

Conforme exposto previamente, na segunda fase do cálculo do índice de confiabilidade (β), a planilha utiliza um método de cálculo equivalente ao Método do Segundo Momento de Primeira Ordem. Neste método as variáveis aleatórias correlacionadas (c e ϕ) formam um elipsóide inclinado centrado nos valores das médias destas variáveis no espaço original. Uma reta dividindo as combinações de c e ϕ que levariam e que não

levariam o sistema à ruptura representa a própria superfície de ruptura. A menor distância desde a superfície de ruptura transformada até a origem das variáveis reduzidas representa o índice de confiabilidade (β).

Para a geração de valores na busca da superfície de ruptura que apresenta menor distância com relação à origem das variáveis reduzidas, a planilha utiliza a ferramenta 'solver' do programa EXCEL. Nesta análise as variáveis aleatórias foram consideradas como obedecendo a uma distribuição normal. As considerações feitas para a análise de confiabilidade da seção 646406, utilizando o procedimento proposto por Low & Tang (1997), são as mesmas feitas para o caso do talude genérico de mineração analisado no item 3.5.2.

Após proceder as análises através da planilha para as três condições de piezometria consideradas, os seguintes resultados foram obtidos (apresentados e sistematizados nas Tabelas 7.2 a 7.4):

- Para a condição de nível d'água a uma profundidade de 20 m, o índice de confiabilidade (β) encontrado foi de 1,291, com um valor de probabilidade de ruptura (P_r) da ordem de $1/10$;
- Para a condição de nível d'água a uma profundidade de 40 metros o índice de confiabilidade (β) encontrado foi de 3,920, com um valor de probabilidade de ruptura (P_r) da ordem de $5/10^{-5}$;
- Para a condição de nível d'água a uma profundidade de 100 metros o índice de confiabilidade (β) encontrado foi de 5,239, com um valor de probabilidade de ruptura (P_r) da ordem de $1/10^{-7}$.

As probabilidades de ruptura foram obtidas diretamente de tabelas de valores da função de distribuição de probabilidade normal padrão acumulada, disponíveis na literatura técnica.

Cálculo do índice de confiabilidade β de taludes usando o método de Janbu: seção 646406 NA = 20m

Fatia	Tan α	ΔX	p	u	c	Tan ϕ	ΔQ	h_i 0	Tan α_i
1	1,225	59	61,55	4,2	0,06	0,544	0	15,63	0,609
2	0,777	36	103,42	27,9	0,06	0,544	0	20,93	0,802
3	0,629	13	112,34	30,3	0,06	0,544	0	18,97	0,329
4	0,509	36	134,79	32,9	0,06	0,544	0	26,03	0,409
5	0,324	54	151,61	31,22	0,06	0,544	0	20,62	0,443
6	0,217	4,24	136,37	27,86	0,06	0,544	0	20,15	0,305
7	0,132	45,93	112,92	19,38	0,06	0,544	0	12,24	0,25
8	0,021	21,83	71,51	5,55	0,06	0,544	0	7,6	0,119
9	-0,039	15	44,31	0	0,06	0,544	0	4,45	0,141
10	-0,095	19	19,74	0	0,06	0,544	0	0	-

FS
1,000

Fatia	B	A'	n	A	ΔE	E 0	$\Delta E/\Delta X$	T 0	ΔT	t	τ	σ'
1	4448,53	1845,31	0,67	2768,60	1679,93	1679,93	30,55	0,00	0,00	0,00	18,765	34,362
2	2892,86	1481,95	0,89	1670,31	1222,56	2902,48	31,36	0,00	0,00	0,00	28,931	53,041
3	918,60	581,28	0,96	604,36	314,24	3216,72	16,60	0,00	0,00	0,00	33,311	61,088
4	2469,89	1998,61	1,01	1970,53	499,36	3716,08	13,87	0,00	0,00	0,00	43,474	79,762
5	2652,57	3541,61	1,06	3326,77	-674,20	3041,88	-12,49	0,00	0,00	0,00	55,754	102,326
6	125,47	250,67	1,07	234,75	-109,28	2932,61	-25,77	0,00	0,00	0,00	52,875	97,036
7	684,61	2341,16	1,05	2222,31	-1537,70	1394,91	-33,48	0,00	0,00	0,00	47,556	87,263
8	32,78	785,06	1,01	776,53	-743,74	651,16	-34,07	0,00	0,00	0,00	35,556	65,213
9	-25,92	362,69	0,98	371,12	-397,04	254,12	-26,47	0,00	0,00	0,00	24,704	45,273
10	-35,63	205,34	0,94	218,49	-254,12	0	-13,37	0	0,00	0,00	11,397	20,823
	14163,76			14163,77								

	Média	Dv.Padrão	Xvalores	Cov	BETA
c	3,670	3,30	0,064	90%	1,291
ϕ	29,590	1,48	28,571	5%	

	Matriz de correlação		Vetor coluna	Transposta "nxv"
c	1	0	[(x-m) σ]	-1,093
ϕ	0	1		
				-1,093 -0,688

Tabela 7.2: Cálculo de β (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 20 m de profundidade através da planilha

Cálculo do índice de confiabilidade β de taludes usando o método de Janbu: seção 646406 NA = 40m

Fatia	Tan α	ΔX	p	u	c	Tan ϕ	ΔQ	h_i	$Tan \alpha_i$
1	1,43	47	44,92	0	0,00	0,446	0	13,07	0,705
2	0,89	36	93,66	2,8	0,00	0,446	0	19,09	0,832
3	0,7	13	106,65	7,6	0,00	0,446	0	18,17	0,355
4	0,56	36	131,86	10,7	0,00	0,446	0	25,43	0,437
5	0,35	54	151,67	10,7	0,00	0,446	0	21,07	0,404
6	0,23	5,19	136,97	8,26	0,00	0,446	0	20,24	0,309
7	0,13	46,1	113,39	0	0,00	0,446	0	12,24	0,221
8	0,01	20,7	73,3	0	0,00	0,446	0	7,64	0,148
9	-0,05	15	45,47	0	0,00	0,446	0	4,77	0,104
10	-0,11	19	20,23	0	0,00	0,446	0	0	-

Fatia	B	A'	n	A	ΔE	E	$\Delta E/\Delta X$	T	ΔT	t	τ	σ'
1	3019,07	940,60	0,54	1749,47	1269,61	1269,61	28,92	0,00	0,00	0,00	12,225	27,439
2	3000,87	1457,28	0,78	1870,08	1130,78	2400,39	29,59	0,00	0,00	0,00	28,987	65,062
3	970,52	573,68	0,88	651,57	318,94	2719,33	19,07	0,00	0,00	0,00	33,638	75,503
4	2658,30	1943,26	0,95	2042,96	615,34	3334,67	17,09	0,00	0,00	0,00	43,201	96,967
5	2866,56	3391,48	1,03	3293,39	-426,83	2907,84	-7,90	0,00	0,00	0,00	54,333	121,953
6	163,50	297,61	1,05	284,23	-120,73	2787,11	-23,26	0,00	0,00	0,00	52,013	116,747
7	679,55	2328,87	1,04	2238,57	-1559,02	1228,09	-33,82	0,00	0,00	0,00	47,752	107,182
8	15,17	675,99	1,00	673,06	-657,89	570,20	-31,78	0,00	0,00	0,00	32,512	72,975
9	-34,10	303,87	0,98	311,57	-345,67	224,53	-23,04	0,00	0,00	0,00	20,719	46,506
10	-42,28	171,25	0,94	182,25	-224,53	0	-11,82	0	0,00	0,00	9,477	21,273
	13297,15			13297,16								

	Média	Dv.Padrão	Xvalores	Cov	BETA
c	3,670	3,30	0,000	90%	3,920
ϕ	29,590	1,48	24,026	5%	

	Matriz de correlação		Vetor coluna	Transposta "nxv"
	[(x-m)/ σ]			
c	1	0	-1,112	
ϕ	0	1	-3,759	-1,112 -3,759

Tabela 7.3: Cálculo de β (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 40 m de profundidade através da planilha

Cálculo do índice de confiabilidade β de taludes usando o método de Janbu: seção 646406 NA = 100m

Fatia	Tan α	ΔX	p	u	c	Tan ϕ	ΔQ	h_t 0	Tan α_t
1	2,010	22,910	35,010	0	0,00	0,404	0	10,77	0,9
2	1,180	36,000	92,790	0	0,00	0,404	0	21,13	0,93
3	0,856	13,000	114,910	0	0,00	0,404	0	20	0,41
4	0,648	36,000	145,180	0	0,00	0,404	0	28,4	0,451
5	0,367	54,000	168,800	0	0,00	0,404	0	24,07	0,33
6	0,182	19,440	148,650	0	0,00	0,404	0	21,11	0,247
7	0,041	42,530	117,000	0	0,00	0,404	0	12,2	0,174
8	-0,075	10,030	80,710	0	0,00	0,404	0	9,85	0,079
9	-0,132	15,000	60,060	0	0,00	0,404	0	6,61	-0,052
10	-0,211	19,000	31,240	0	0,00	0,404	0	0	-

Fatia	B	A'	n	A	ΔE	E 0	$\Delta E/\Delta X$	T 0	ΔT	t	τ	σ'
1	1612,18	324,08	0,36	901,36	710,82	710,82	41,86	0,00	0,00	0,00	7,806	19,320
2	3941,72	1349,71	0,62	2186,54	1755,18	2466,00	46,06	0,00	0,00	0,00	25,388	62,833
3	1278,72	603,58	0,78	777,08	501,64	2967,63	30,86	0,00	0,00	0,00	34,498	85,380
4	3386,76	2111,76	0,89	2376,32	1010,44	3978,07	28,07	0,00	0,00	0,00	46,488	115,056
5	3345,28	3683,00	1,01	3639,39	-294,11	3683,97	-5,45	0,00	0,00	0,00	59,396	147,002
6	525,94	1167,61	1,04	1123,65	-597,72	3086,25	-30,75	0,00	0,00	0,00	55,948	138,467
7	204,02	2010,56	1,01	1981,12	-1777,10	1309,15	-41,78	0,00	0,00	0,00	46,503	115,093
8	-60,71	327,09	0,96	339,21	-399,92	909,23	-39,87	0,00	0,00	0,00	33,630	83,232
9	-118,92	364,01	0,93	391,22	-510,14	399,09	-34,01	0,00	0,00	0,00	25,634	63,444
10	-125,24	239,83	0,88	273,85	-399,09	0	-21,00	0	0,00	0,00	13,799	34,152
	13989,73			13989,74								

	Média	Dv.Padrão	Xvalores	Cov	BETA
c	3,670	3,30	0,000	90%	5,239
ϕ	29,590	1,48	22,012	5%	

	Matriz de correlação		Vetor coluna	Transposta "nxv"
	[(x-m)/ σ]			
c	1	0	-1,112	
ϕ	0	1	-5,120	
			-1,112	-5,120

Tabela 7.4: Cálculo de β (método de Janbu) para a seção 646406 considerando NA a 100 m de profundidade através da planilha

7.3.2 – Programa SLOPE/W – seção 646406

Para comparar os valores de índice de confiabilidade encontrados para os taludes da seção 646406 analisados na seção anterior, os mesmos taludes foram analisados através do programa SLOPE/W, que utiliza, na sua formulação, o método da Simulação de Monte Carlo.

As análises cujos resultados são apresentados a seguir (figuras 7.2 a 7.4) foram realizadas fazendo as seguintes considerações: o método de análise de estabilidade adotado foi o de Janbu Modificado; o número de iterações utilizado para o método da Simulação de Monte Carlo foi de 23270 iterações, de acordo com o que foi descrito no item 3.4.4. Este número de iterações foi considerado representativo satisfazendo o critério de convergência, uma vez que valores maiores de números de iterações apresentaram valores pouco diferentes para o índice de confiabilidade (β).

Além disso, os parâmetros considerados como variáveis aleatórias foram a coesão (c) e o ângulo de atrito (ϕ). Neste caso os valores médios destes parâmetros foram obtidos através da tabela 5.8, e não como na planilha através de médias ponderadas. Os valores de coeficiente de variação para as variáveis aleatórias consideradas foram aqueles apresentados no item 7.2.

Deste modo, os resultados obtidos para as análises de confiabilidade dos taludes da seção 646406 através do programa SLOPE/W estão mostrados nas figuras que se seguem e podem ser traduzidos pelos valores anexos do índice de confiabilidade (β) e da probabilidade de ruptura (P_r).

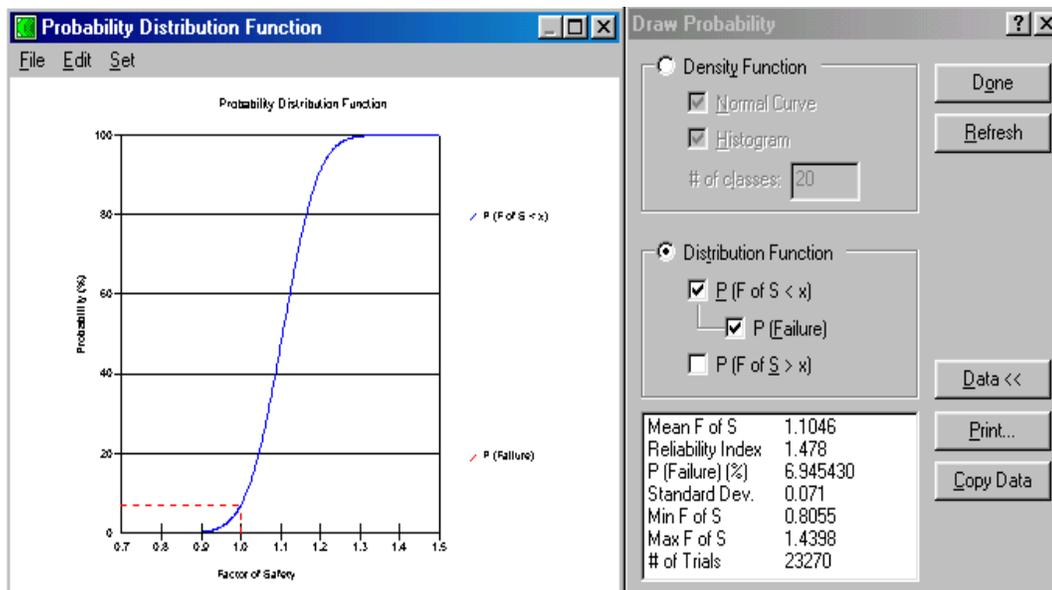


Figura 7.2: Resultados da análise de confiabilidade – Seção 646406 NA 20m

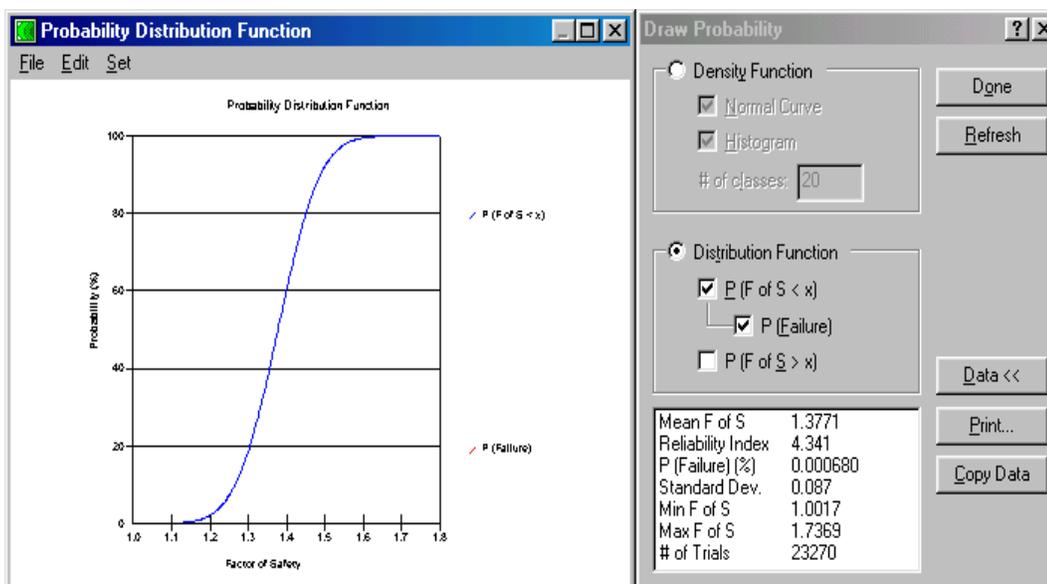


Figura 7.3: Resultados da análise de confiabilidade – Seção 646406 NA 40m

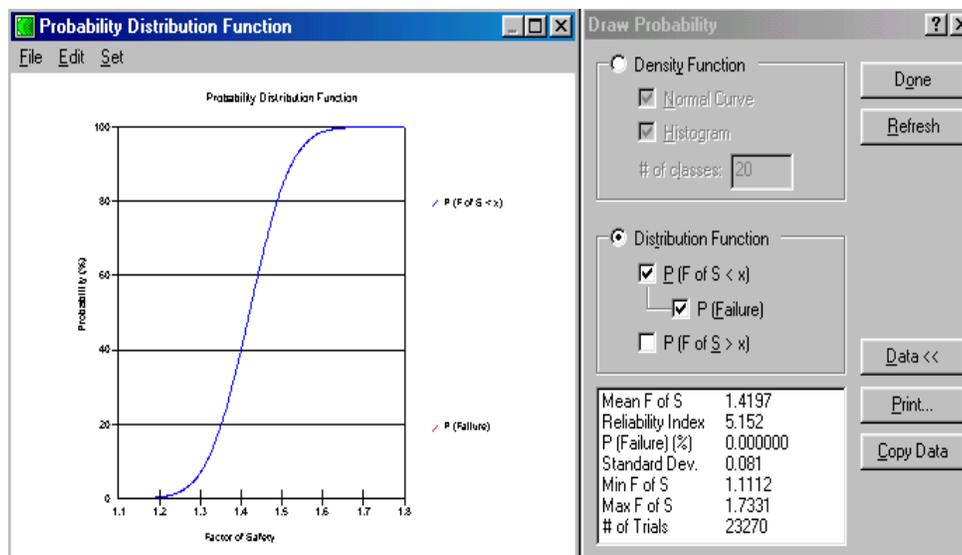


Figura 7.4: Resultados da análise de confiabilidade – Seção 646406 NA 100m

Observa-se que, para a condição de profundidade do nível d'água a 20m, o talude apresenta um índice de confiabilidade β igual a 1,478 e uma probabilidade de ruptura P_r de 6,94% (figura 7.2). Para o N.A. a 40m de profundidade, tem-se $\beta = 4,341$ e uma probabilidade $P_r = 6,8 \times 10^{-4} \%$. E, finalmente, na condição de N.A. a 100m, o valor de β é igual a 5,152 e o de P_r é da ordem de $10^{-5} \%$.

7.3.3 – Comparação dos resultados obtidos para a seção 646406

Tendo em vista os valores obtidos através das análises de confiabilidade utilizando como ferramentas a planilha proposta por Low & Tang (1997) e o software SLOPE/W, de acordo com as condições descritas nas seções anteriores e, particularmente, considerando que:

- (i) os resultados foram obtidos através da formulação do método de equilíbrio limite de Janbu Modificado, com métodos distintos de análise de confiabilidade: Simulação de Monte Carlo no programa SLOPE/W e Segundo Momento de Primeira Ordem nas planilhas; (ii) em ambos os casos, foram adotados os mesmos valores dos coeficientes de variação para as variáveis aleatórias consideradas: $CV(c)=90\%$ e $CV(\Phi)=5\%$.

Com base nestes princípios, foram efetuadas as análises, cujos resultados estão indicados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5: Comparação entre os resultados das análises de confiabilidade - seção 646406 - através do SLOPE/W e da planilha eletrônica (Low & Tang ,1997)

Seção 646406 - Análises de confiabilidade				
N.A.	Planilha		SLOPE/W	
	β	Pr	β	Pr
20	1,29	9,85	1,47	6,95
40	3,92	$4,4 \times 10^{-3}$	4,34	$6,8 \times 10^{-4}$
100	5,23	10^{-5}	5,15	10^{-5}

Os valores do índice de confiabilidade e da probabilidade de ruptura encontrados através das duas ferramentas de análise (SLOPE/W e planilha estatística) mostraram-se bastante coerentes, embora utilizem-se de metodologias de análise de confiabilidade distintos.

7.3.4 – Análises de confiabilidade dos demais taludes da Cava de Gongo Soco

De forma similar às análises implementadas para os taludes da mina da seção 646406, foram efetuadas análises adicionais para as condições dos taludes correspondentes às demais seções analisadas.

Estas análises compreenderam as seções apresentadas na seção 7.3.2. Nestes casos, apresentam-se apenas os valores obtidos com base no programa SLOPE/W, com base nos métodos de Janbu Modificado (não rigoroso), Bishop Modificado (não rigoroso) e Spencer (rigoroso). Constata-se, pela comparação direta entre os valores obtidos (Tabela 7.6), que o Método de Janbu Modificado é um método mais conservador que os demais, já que sempre apresenta valores de segurança e índices de confiabilidade mais críticos que os apresentados pelos outros métodos.

A tabela 7.6 apresenta os valores de Fator de Segurança (FS), índice de confiabilidade (β) e probabilidade de ruptura (P_r) para os três métodos de análise de estabilidade supracitados e para as três condições de piezometria consideradas e para os taludes das cinco seções representativas da Mina de Gongo Soco.

Tabela 7.6: Resultados das análises de confiabilidade dos taludes de Gongo Soco

Seção	Prof. N.A. (m)	Fator de Segurança - FS			Índice de Confiabilidade - β			Probabilidade Ruptura - Pr (%)		
		Bishop	Spencer	Janbu	Bishop	Spencer	Janbu	Bishop	Spencer	Janbu
646806	30	1,16	1,20	1,03	4,49	5,67	0,96	3,30E-04	0	16,76
	40	1,28	1,32	1,16	7,73	6,59	4,28	0	0	8,80E-04
	100	1,43	1,47	1,33	9,35	10,21	7,83	0	0	0
646406	20	1,24	1,27	1,10	3,24	3,84	1,48	5,90E-02	6,30E-03	6,59
	40	1,53	1,56	1,38	6,15	6,64	4,34	0	0	6,80E-04
	100	1,53	1,57	1,40	6,20	6,56	5,15	0	0	0
646706	20	1,13	1,17	1,03	2,98	3,82	0,83	0,14	6,50E-03	20,23
	40	1,42	1,47	1,26	9,16	10,17	6,52	0	0	0
	100	1,60	1,60	1,56	8,03	8,08	7,66	0	0	0
647056	20	1,24	1,27	1,17	5,07	5,68	3,87	0	0	5,50E-03
	40	1,48	1,51	1,40	9,40	9,91	8,50	0	0	0
	100	1,61	1,62	1,56	9,18	9,39	8,98	0	0	0
646630	20	1,26	1,30	1,11	4,29	5,03	2,21	8,60E-04	0	1,33
	40	1,54	1,55	1,44	6,26	6,52	5,69	0	0	0
	100	1,55	1,57	1,45	6,31	6,57	5,75	0	0	0

Com base nestes resultados, pode-se concluir que, para a condição de nível d'água a 20 m de profundidade (ou 30 m na seção 646806), os taludes da cava tendem a apresentar, em quase todas as seções, baixos fatores de segurança que, aliados aos índices de confiabilidade e probabilidades de ruptura correspondentes, não atendem as condições de estabilidade para taludes de mineração.

No caso das análises feitas através do Método de Janbu Modificado esta situação torna-se ainda mais crítica. Por exemplo, no caso da seção 646806 com nível d'água a 30 metros de profundidade, as análises indicaram um valor FS = 1,03 aliado a um índice de

confiabilidade $\beta = 0,96$, evidenciando as condições críticas dos talude desta seção, que apresentam uma probabilidade de ruptura de aproximadamente 17%, muito elevada e inaceitável em termos de projeto.

Uma situação ainda mais crítica foi constatada no caso do talude da seção 646706, para a hipótese de nível d'água a uma profundidade de 20 m. Os resultados das análises deste talude pelo Método de Janbu Simplificado indicaram um valor de $FS = 1,03$, igual ao anterior, mas associado a uma probabilidade de ruptura maior, superior a 21%.

Para as condições de nível d'água profundo (40 m), as condições de estabilidade dos taludes mostram-se sensivelmente melhoradas. Com o NA a 40 m de profundidade, algumas seções ainda apresentam fatores de segurança e índices de confiabilidade que não são satisfatórios para taludes de mineração, como no caso da seção 646806. Para o NA muito profundo (100m), todas as seções apresentaram condições satisfatórias de estabilidade com fatores de segurança maiores que 1,30 e probabilidades de ruptura menores que 10^{-5} % (alto índice de confiabilidade).

As análises precedentes demonstram que as condições de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco são condicionadas, em larga escala, pelas condições hidrogeológicas dos maciços, implicando, portanto, a necessidade de implantação de sistemas locais para o rebaixamento do lençol freático em todas as seções analisadas, visando uma melhoria efetiva de suas condições de estabilidade global.

Capítulo 8

Conclusões, Recomendações Finais e Sugestões de Pesquisas Adicionais

Como síntese final dos estudos desenvolvidos neste trabalho, são apresentadas as principais conclusões e as recomendações de estudos complementares, visando um maior conhecimento e utilização dos métodos estatísticos e da teoria da confiabilidade em problemas geotécnicos, particularmente em taludes de mineração.

8.1 – Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal implementar estudos complementares às análises de estabilidade dos taludes da Mina de Gongo Soco, mediante uma abordagem probabilística. Para isto, foram implementadas planilhas eletrônicas para avaliação da estabilidade dos taludes estudados, de acordo com a metodologia de análise de confiabilidade proposta por Low & Tang (1997), baseada no método FORM. Estas planilhas permitem um tipo de análise de estabilidade mais acessível e menos dependente dos programas comercialmente disponíveis.

Para fins de calibração e avaliação prévia destas planilhas, foram feitas análises utilizando as mesmas para o caso de um talude genérico de mineração, de acordo com a geometria e parâmetros apresentados por Guedes (1997). Desta forma, tornou-se possível avaliar a validade desta ferramenta através da comparação com os resultados obtidos no trabalho original, que incluíram também uma versão da metodologia FORM, denominada neste trabalho de ‘método equivalente’.

Tendo em vista os resultados encontrados para as análises do talude de mineração genérico usado como exemplo e os resultados obtidos por Guedes (1997), conclui-se que:

- Os resultados obtidos para a análise de estabilidade determinística do talude através da planilha implementada no presente trabalho ($FS = 1,194$) e da aplicação do programa SLOPE/W, comercialmente disponível e de uso bastante generalizado em engenharia geotécnica ($FS = 1,171$), ambos resultantes da aplicação do método de Janbu Modificado, ratificam a validade da abordagem desenvolvida;
- As análises de confiabilidade aplicadas ao talude, através do método equivalente ao método do Segundo Momento de Primeira Ordem, programa SLOPE/W, planilhas propostas por Low & Tang (1997) e o método proposto por Duncan (2000), indicam que o parâmetro com maior influência na variância do Fator de Segurança é o ângulo de atrito, seguido pela piezometria e a coesão, sendo que os valores dos pesos específicos natural e saturado não apresentaram influência significativa no valor total da variância do fator de segurança;
- Os resultados destas análises de confiabilidade indicam uma grande proximidade nas ferramentas de análise. Apesar de utilizarem métodos de análise de confiabilidade distintos, estas ferramentas mostraram-se bastante coerentes quanto aos resultados produzidos. Considerando uma análise de estabilidade probabilística pelo método de Janbu Modificado, os resultados de índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura produzidos variaram entre 1,19 a 1,25 para β e 8,9% a 12,1% para P_r , respectivamente;
- Comparando os resultados encontrados neste trabalho com aqueles encontrados por Guedes(1997) para o mesmo exemplo, de acordo com o item 3.6 e as tabelas 3.14 e 3.15, constatou-se uma grande reprodutibilidade dos resultados, que não apresentaram diferenças substanciais. É importante ressaltar que a validade destas comparações diretas entre resultados é válida somente considerando a consistência entre as metodologias de estabilidade e confiabilidade adotadas por cada uma das ferramentas utilizadas.

As análises determinísticas realizadas para o caso da seção 646406 serviram como base para validar a planilha determinística proposta por Low & Tang (1997). O método de estabilidade utilizado pela planilha foi o de Janbu Modificado e, considerando os três níveis de piezometria analisados, foram obtidos fatores de segurança da ordem de: 1,17 (NA a 20 m); 1,41 (NA a 40 m) e 1,52 (NA a 100 m). Os valores encontrados pelo programa SLOPE/W, para as mesmas condições consideradas na planilha, foram de 1,11(NA a 20 m); 1,36 (NA a 40 m) e 1,50 (NA a 100 m).

Estes resultados demonstram a validade da planilha frente a um software comercial bastante utilizado no meio geotécnico. Além disso, mostra que é possível estender a análise de estabilidade para todas as demais seções da mina através da planilha, já que esta pode ser de domínio generalizado e de fácil acessibilidade por depender apenas de softwares simples como o Microsoft EXCEL.

As análises de confiabilidade empregadas sobre a seção 646406, do mesmo modo que as análises determinísticas, serviram como base para validar as ferramentas utilizadas para este tipo de análise (planilha estatística), face aos resultados oriundos do programa SLOPE/W. Em ambos os casos o método de análise de estabilidade utilizado foi o de Janbu Modificado. A planilha utiliza um método de análise de confiabilidade equivalente ao método do Segundo Momento de Primeira Ordem, de acordo com o que foi descrito no capítulo 3 seção 3.5.2, enquanto o programa SLOPE/W faz uso do método da Simulação de Monte Carlo para proceder às mesmas análises.

Desta maneira, os resultados encontrados evidenciam a proximidade dos valores de índice de confiabilidade e probabilidade de ruptura obtidos em ambas as metodologias, levando-se em consideração os diferentes cenários para a piezometria local. Demonstra-se, mais uma vez, a validade das planilhas propostas por Low & Tang (1997) para a análise de confiabilidade dos taludes considerados. Esta ferramenta foi amplamente empregada também para as demais seções típicas dos taludes da mina.

Após extrapolar estes procedimentos às demais seções representativas dos taludes da Mina de Gongo Soco, tornou-se possível estabelecer, de forma indubitável, a especial relevância que tem as condições hidrogeológicas na estabilidade dos taludes locais, condicionada, em larga escala, por uma manutenção forçada das águas subterrâneas em níveis profundos nos maciços. Assim sendo, é fundamental a implantação de um sistema de drenagem profunda específico para o controle das pressões hidrostáticas no maciço encaixante para prosseguimento operacional da lavra.

Os taludes analisados na condição de nível d'água a 20 metros de profundidade são aqueles que apresentaram as condições mais críticas de estabilidade. Os valores dos fatores de segurança obtidos previamente (análises determinísticas apresentadas no capítulo 6) já evidenciavam esta situação. Com o auxílio das informações adicionais, consubstanciadas pelas probabilidades de ruptura calculadas, a situação revelou-se ainda mais crítica que as análises determinísticas precedentes (Innocentini, 2003).

Taludes como os da seção 646706 com NA a 20 metros de profundidade apresentam, além de fatores de segurança extremamente baixos ($FS = 1,03$), probabilidades de ruptura consideradas altas ($P_r = 20,23\%$), considerando uma análise pelo método de Janbu modificado. Além disso, fica evidente situações de taludes que, embora apresentem fatores de segurança iguais, apresentam probabilidades de ruptura diferentes. Um exemplo típico (e não o mais crítico neste tipo de abordagem) é o das seções 646806 (NA 30 m) e 646706 (NA 20 m) que apresentam $FS = 1,03$, porém, com probabilidades de ruptura $P_r = 16\%$ e 20% respectivamente.

De um modo geral, as análises probabilísticas fornecem um maior número de dados relativos as análises de estabilidade dos taludes em questão permitindo aos engenheiros geotécnicos ter uma maior segurança nas avaliações feitas. Foi demonstrado que este tipo de análise é mais eficiente que a análise determinística por si só, já que leva em conta a variabilidade dos parâmetros geotécnicos associados a uma condição de seqüência estratigráfica algo complexa.

Planilhas como os modelos desenvolvidos neste trabalho evidenciam que os princípios das análises de confiabilidade podem ser aplicados a problemas geotécnicos sem necessidade de dispor de sofisticados aparatos computacionais, constituindo uma ferramenta adicional de enorme contribuição na prática da engenharia geotécnica.

Como conclusão final, constata-se que as análises probabilísticas dos taludes da Mina de Gongo Soco indicaram condições críticas para as atuais condições operacionais da mina. Com base nestes resultados, procedeu-se à paralisação imediata das atividades mineiras, uma completa reformulação do planejamento de lavra futura, incluindo a proposição de nova configuração para os taludes, associada a procedimentos contínuos de despressurização dos maciços e monitoramento dos taludes.

8.2 – Recomendações Finais e Sugestões para Pesquisas Adicionais

No contexto específico das análises implementadas, como exposto previamente, procedeu-se à extrapolação destes estudos às demais seções representativas dos taludes da Mina de Gongo Soco. Como sugestão de pesquisa complementar, recomenda-se a aplicação destas metodologias a taludes similares de minas de exploração de minério de ferro, situadas no âmbito do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, de forma a se estabelecer, como critério específico, a probabilidade de ruptura admissível para estes taludes de mineração.

Nestas abordagens, seria interessante a implementação de diferentes métodos estatísticos para correlações de resultados e para proposição de faixas admissíveis para o índice de confiabilidade β em taludes de mineração. Adicionalmente, poder-se-ia investigar a adoção de metodologias simplificadas de análises probabilísticas como, por exemplo, o método proposto por Rosenblueth (1975).

Como procedimentos futuros, sugere-se a extrapolação desta abordagem a outras obras geotécnicas, com ênfase no desenvolvimento de ferramentas operacional simples, que

permitam uma rápida e efetiva implementação destas técnicas como procedimento convencional em análises de estabilidade ou de natureza similar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alonso, E. (1976). Risk Analysis of Slopes and its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays. *Geotechnique*, Vol. 26, pp 453-472.

Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1975). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol. 1 – Basic Principles. John Wiley and Sons, Inc, New York.

Ang, A. H. S. and Tang, W. H. (1984). *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Vol. 2. John Wiley and Sons, Inc, New York.

Bieniawsky, Z. T. (1976). *Rock Mass Classifications in Rock Engineering*. Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg.

Campos, T. M. P. (1985). *Análise de Estabilidade: Métodos, Parâmetros e Pressões Neutras*. Artigo Técnico AT 18/85; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Castanheira, A.M. (2004). *Avaliação da Confiabilidade de Vigas Metálicas Dimensionadas pela NBR 8800*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.

Castro, W.J. (2004). *Síntese de Estudos de Estabilidade de Taludes de Minas de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFOP, Ouro Preto, 194p.

Chandler, D. (1996). *Monte Carlo Simulation to Evaluate Slope Stability*. *Uncertainty in the Geologic Environment*, pp 474-493.

Das, B. (1994). *Principles of Geotechnical Engineering*. Boston; PWS Publishing Company.

Dell'Avanzi, E. (1995). Confiabilidade e Probabilidade em Análises de Estabilidade de Taludes. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Duncan, J. M. (2000). Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, April 2000, pp 307-316.

Geoestrutural (2001). Mapeamento Geológico e Geotécnico da Mina de Gongo Soco. 120p., (Companhia Vale do Rio Doce – Relatório Interno). Barão de Cocais, MG.

Geoestrutural (2002). Mapeamento Geológico e Geotécnico – Área Norte da Cava da Mina de Gongo Soco. 80p., (Companhia Vale do Rio Doce – Relatório Interno). Barão de Cocais, MG.

Guedes, M.C.F. (1997). Considerações sobre Análise Probabilística da Estabilidade de Taludes. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Innocentini, M.D.M. (2003). Modelação Geomecânica e Hidrogeológica e Análises de Estabilidade dos Taludes da Mina de Gongo Soco/CVRD. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.

Kiureghian, A.D. and Liu, P.L. (1986). Structural Reliability Under Incomplete Probability Information. Journal of Engineering Mechanics (ASCE), Vol. 112, nº 1.

Landim, P.M.B. (1998). Análise Estatística de Dados Geológicos. Fundação Editora da UNESP.

Low, B.K. & Tang, W.H. (1997). Probabilistic Slope Analysis using Janbu's Generalized Procedure of Slices. Computers and Geotechnics, Vol. 21, nº 2, pp. 121-142.

Madsen, H.O., Krenk, S., Lind, N.C. (1986). *Methods of Structural Safety*. Prentice – Hall Inc., New Jersey.

Pastore, E.L. e Matsuda, K. (1994). *Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mineração pelo método do Equilíbrio Limite*. Comunicação Técnica, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.

Peterson, J.L. (1999). *Probability Analysis of Slope Stability*. Master Thesis, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA.

Racwitz, R. and Fiessler, B. (1978). *Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences*. *Computer and Structures*, Vol. 9.

Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proc. Nacional Academy of Sciences*, 72(10): 3812-3814.

Sagrilo, L.V.S. (1996). *Confiabilidade Estrutural: Notas de Aulas*, COPPE/UFRJ.

Sandroni, S.S. e Sayão, A.S.F.J. (1992). *Avaliação Estatística do Coeficiente de Segurança de Taludes*. 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Taludes, ABMS, Vol. 2, pp. 523-535.

Sobreiro, A.F., Innocentini, M.D.M. (2001). *Modelo Hidrogeológico Conceitual da Mina de Gongo Soco*. (Companhia Vale do Rio Doce – Relatório Interno). Barão de Cocais, MG.

Tang, W., Yucemen, M. e Ang A. (1976). *Probability - Based Short Term Design of Soil Slopes*. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, pp. 201-215.

Wright, S.G. (1969). *A Study of Slope Stability and the Undrained Shear Strength of Clay Shales*. Doctor Thesis, University of California, Berkeley.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)