

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.**

**ÍTALO PRATA DE MENEZES**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho**

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – SP  
2012

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA DESDE QUE CITADA A FONTE.**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M543e Menezes, Ítalo Prata de  
Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas-MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas. / Ítalo Prata de Menezes ; orientador Oswaldo Augusto Filho. São Carlos, 2012.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia)-- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. SIG. 2. Estabilidade de taludes. 3. Mineração. 4. Estereogramas. 5. Mina a céu aberto. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro ÍTALO PRATA DE MENEZES.

Título da dissertação: "Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas".

Data da defesa: 31/08/2012

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Oswaldo Augusto Filho** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Reinaldo Lorandi**  
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Dr. **Frederico Garcia Sobreira**  
(Universidade Federal de Ouro Preto)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Titular **Osni José Pejon**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

---

### Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado



*A minha família, em especial a  
minha querida mãe.*



## **AGRADECIMENTOS**

*Primeiramente, agradeço a Deus por chegar aonde cheguei. Agradeço ao meu orientador, Oswaldo Augusto Filho pelo apoio e por me guiar ao longo deste trabalho, com todo seu conhecimento e experiência.*

*Agradeço ao meu pai, José Maria e a minha amada mãe, Maria da Conceição, que não pouparam esforços, carinho e amor para fazer com que seus filhos se tornassem o que são hoje. Agradeço aos meus irmãos, Thiago e Tatiana, pelo constante apoio e por saber que são pessoas o qual sempre posso confiar.*

*Agradeço também a minha amiga e companheira Franciane, pelo apoio e conforto ao longo desta jornada.*

*Agradeço também aos meus familiares e amigos especialmente ao Alysson, Felipe, Flávia, Francisco, Ingrid, Rodolfo e Tiago e aos amigos que fiz em São Carlos, Camilo, Cláudia, Mariana, Paola, Patrícia, Simone, Stênio e Tania pelo conhecimento compartilhado e pela jornada que fizemos juntos. E aos amigos da VOGBR.*

*Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo incentivo e apoio a pesquisa. Agradeço a empresa VALE S/A pela disponibilização das informações utilizadas neste trabalho, em especial ao Fernando Frigo e a Clíscia Cerceau.*

*Aos funcionários e professores do Departamento de Geotecnia, meu muito obrigado pelo apoio e a dedicação ao ensino. Estendo meu agradecimento também aos demais professores que contribuíram para meu crescimento ao longo de minha jornada acadêmica, especialmente aos professores do Departamento de Geologia da UFOP.*

## RESUMO

Menezes, I. P. **Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas**. 2012. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Métodos de estudo de estabilidade de taludes são diversificados e estão bastante desenvolvidos e consolidados na Geologia de Engenharia. Paralelamente, a aplicação de ferramentas de geoprocessamento tem se intensificado bastante em todos os campos de conhecimento técnico científico, demonstrando ser uma ferramenta de grande importância e auxiliando a tomada de decisão, sendo inclusive utilizado no estudo de escorregamentos e processos correlatos a instabilização de taludes. Dentro deste contexto, este trabalho objetivou desenvolver uma abordagem de estudo para caracterizar a estabilidade de taludes de mineração combinando técnicas e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnica. A pesquisa foi aplicada nas minas de ferro do complexo Fazendão, localizadas no município de Catas Altas (MG) e são de propriedade da companhia VALE S/A. O trabalho está dividido essencialmente em duas etapas de estudo: primeiramente um foco semi-regional, seguido de um estudo de detalhe em uma mina em particular. Para a análise semi-regional foi utilizando Sistema de Informação Geográfica - SIG para geração de mapas temáticos, abrangendo todas as minas do complexo. Já no estudo de detalhe, foram realizados levantamentos sistemáticos em campo na mina de São Luís, sendo posteriormente realizado um levantamento específico de seções dentro da mina. A partir dos mapas temáticos foram identificadas as principais drenagens e bacias hidrográficas da área de estudo. Estes mapas juntamente com os mapas de declividade, curvatura, direção de vertente e mapa geológico, forneceram informações importantes sobre a região onde as minas estão inseridas, o que possibilita um melhor planejamento das intervenções que vierem a serem feitas. As análises por estereogramas indicaram várias situações de instabilidade frente às direções de fraturas e bandamento, com relação à direção e ângulo de mergulho de alguns taludes, sendo várias destas feições identificadas em campo. Por outro lado, a análise por equilíbrio limite apontam fatores de segurança muito altos, desde que não ocorra a influência do nível de água. Por fim, a abordagem



utilizada foi bastante útil na caracterização da região. O estudo semi-regional em conjunto com uma análise de detalhe permitiu identificar feições que comprometem a segurança dentro da mina. A partir do resultado deste estudo, espera-se auxiliar a programação do avanço da mina de forma otimizar sua exploração, sem comprometer a segurança.

Palavras-chave: SIG, Estabilidade de taludes, Mineração, Estereogramas, Mina a céu aberto.

## ABSTRACT

Menezes, I. P. **Study of slope stability of open pit mine São Luís in Catas Altas / MG combining geoprocessing techniques and usual methods of investigation and geological-geotechnical analysis.** Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

Methods of study of slope stability are diverse and are well developed and consolidated in Engineering Geology. In addition, the application of GIS tools has intensified greatly in all fields of scientific expertise, proven to be an important tool aiding in the decision making, including being used in the study of landslides and processes related to slope instability. Within this context, this study aimed to develop a approach to characterize the stability of slopes mining combining geoprocessing techniques and the usual methods of investigation and analysis of geological-geotechnical. The research was applied to the iron mines of Fazendão complex, located in the municipality of Catas Altas (MG) and are the property of the company VALE S/A. The research is divided into two main stages of the study: first a semi-regional focus followed by a study in detail of a particular mine. For the semi-regional analysis has been using GIS for thematic maps, covering all the mines the complex. In the study of detail, systematic surveys were conducted in the field for geological and geotechnical parameters in the mine of São Luís, and later conducted a survey within specific sections of the mine. From the thematic maps were identified the major drainage and hydrographic basins of the study area. Those maps, analyzed together with the slope map, curvature, direction of slope and geologic map provided important information about the area which the mines are located, allowing better planning of interventions that were to be made. The stereograms analyzes indicated various situations of instability depending of the fractures and banding directions, according to direction and dip angle of some slopes, some of it identified in the field. Moreover, the limit equilibrium analysis safety factors showed very high, since there was no influence of the water levels. Finally, the used approach was useful in characterizing the region. The semi-regional study combined with a detail analysis allowed to identify features that compromise the safety inside the mine. From the results of this study is expected to help advance the schedule of the mine in order to optimize their operations, without compromising security.

Keywords: GIS, Slope stability, Mining, Stereogram, Open pit mine.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Tipos de ruptura em maciços rochosos e possíveis rupturas planares segundo a descontinuidade presente. (Modificado de HOEK; LONDE, 1974; PITEAU; MARTIN, 1981 apud SERRA JUNIOR; OJIMA, 1998).....	32
Figura 3.2 – Tipos de rupturas por tombamentos. (a) Tombamento flexural; (b) tombamento de blocos; (c) tombamento bloco-flexural (modificado de GOODMAN; BRAY, 1976).....	33
Figura 3.3 – Classificação proposta por Deere e Patton (1971) focado em estabilidade de taludes (apud AUGUSTO FILHO; VIRGILLI, 1998).....	35
Figura 3.4 – Perfil de alteração proposto por Vaz (1996) para regiões tropicais.....	37
Figura 3.5 – Influência da escala na avaliação de maciços rochosos (modificado de HOEK, 1983)...	40
Figura 3.6– Etapas de investigação geológico-geotécnica propostas por Augusto Filho voltado a correção de escorregamentos (modificado de AUGUSTO FILHO,1992). ....	49
Figura 3.7 – Principais etapas de um estudo de retroanálise segundo Gama (1984).....	57
Figura 3.8 – Tipos de rompimento de talude e sua respectiva apresentação em projeção estereográfica (modificado de HOEK; BRAY,1981).....	58
Figura 3.9 – Análise em estereograma para ruptura em cunha (modificado de HOEK; BRAY, 1981). 60	
Figura 3.10 – Condições de tombamento ilustradas em corte e estereograma (modificado de Goodman, 1989).....	60
Figura 3.11 – Modelo de superfície gerado a partir de uma grade regular (NAMIKAWA, 1995).....	64
Figura 3.12– Exemplo de uma malha triangular irregular (NAMIKAWA, 1995).....	65
Figura 4.1– Mapa de localização da área de estudo .....	69
Figura 4.2 – Mapa da região apresentando as 3 minas que compõem o conjunto de minas de Fazendão: Mina de Almas a norte, Tamanduá ao centro e São Luís a sul. ....	70
Figura 4.3– Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Modificado de ALKMIM; MARSHAK, 1998).....	72
Figura 5.1 – Fluxograma resumindo os passos tomados para a geração da base topográfica utilizada neste estudo. ....	77
Figura 5.2 – Fluxograma apresentando os passos para geração dos mapas temáticos. ....	80
Figura 6.1 – Dados iniciais de topografia iniciais e a interpolada pelo MDT na escala 1:10.000 com espaçamento de 5 metros. ....	86
Figura 6.2 – Histograma apresentando a quantidade de pontos inseridos em alguns intervalos de valores de RMS. ....	89

Figura 6.3 – Mapa da área de estudo apresentando os pontos utilizados para verificação da topografia, destacando aqueles com RMS maior que o valor médio. ....	90
Figura 6.4 – Mapa da área de estudo apresentando as drenagens e bacias de captação delimitadas. ....	92
Figura 6.5 – Mapa de pontos das minas São Luís e Tamanduá/Almas. ....	97
Figura 6.6 – Erosões na mina de São Luís afetando vários taludes. ....	98
Figura 6.7 – Detalhe de uma erosão, que destruiu totalmente o acesso da bancada superior. ....	99
Figura 6.8 – Mapa de classes de maciço da mina de São Luís. ....	100
Figura 6.9 – Itabirito friável (RAM) com acumulação de material na base do talude. ....	101
Figura 6.10 – Itabirito ocre característico de RAD na mina São Luís. ....	102
Figura 6.11 – Talude apresentando núcleos de itabirito compacto (RS). ....	103
Figura 6.12 – Concentração de polos apresentando a direção preferencial dos taludes nas seções: A) Seção 1; B) Seção 2 e C) Seção 3. ....	104
Figura 6.13 – Perfil de alteração para a seção 1 ....	106
Figura 6.14 – Perfil de alteração obtido para a seção 2. ....	107
Figura 6.15 – Perfil de alteração obtido para a seção 3. ....	108
Figura 6.16 – Formação de estruturas em lápis devido ao alto grau de deformação. ....	109
Figura 6.17 – Linhas demonstrando a intersecção do bandamento com o talude. ....	110
Figura 6.18 – Direção geral do bandamento ( $S_b$ ) dos itabiritos dentro da mina São Luís. ....	111
Figura 6.19 – Direção geral do bandamento ( $S_b$ ) dos itabiritos dentro das minas tamanduá/Almas. ....	111
Figura 6.20 – Direção da foliação/xistosidade ( $S_n$ ) nas rochas adjacentes ao itabirito. ....	112
Figura 6.21 – Direções de taludes na mina São Luís, com direção principal ( $T_1$ ) N17°E; 54°SE e direção secundária ( $T_2$ ) N66°W; 55°SW. ....	113
Figura 6.22 – Gráfico apresentando a concentração de pontos por faixas de inclinação de inclinação na mina de São Luís. ....	113
Figura 6.23 – Estereograma contendo dados das fraturas coletadas durante o mapeamento, indicando o plano geral das 3 principais famílias de discontinuidades. ....	114
Figura 6.24 – Análise de ruptura planar para o talude $T_1$ . ....	115
Figura 6.25 – Deslocamento devido ao bandamento do itabirito na mina São Luís. ....	116
Figura 6.26 – Análise de ruptura em cunha para o talude de direção N66°W; 55°SW. ....	117
Figura 6.27 – Análise de ruptura em cunha para o talude de direção N17°E; 54°SE. ....	117

Figura 6.28 – Talude apresentando ruptura em cunha formado pela interseção do bandamento ( $S_b$ ) com o plano de fratura $F_3$ . .....	118
Figura 6.29 – Análise de ruptura por tombamento para o talude de direção N17°E; 54°SE. ....	119
Figura 6.30 – Análise de ruptura por tombamento para o talude $T_2$ , de direção N66°W; 55°SW. ....	120
Figura 6.31 – Rompimento circular observado na mina São Luís. ....	120
Figura 6.32 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa WinStabl.....	121
Figura 6.33 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide para pesquisa de 50 superfícies de ruptura. ....	122
Figura 6.34 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide para pesquisa de 5000 superfícies de ruptura. ....	123
Figura 6.35 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 950 metros utilizando o programa WinStabl.....	124
Figura 6.36 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide. ....	125
Figura 6.37 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 1000 metros utilizando o programa WinStabl.....	125
Figura 6.38 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide. ....	126
Figura 6.39 – Comparação entre as análises de estabilidade pelos métodos de Janbu (cor vermelha) e Bishop (cor verde). ....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978). .....	27
Tabela 3.2 – Classificação fenomenológica proposta por Augusto Filho apresentando os principais grupos de escorregamento (modificado de Augusto Filho 1992). .....	30
Tabela 3.3 – Classificação do grau de alteração de rochas (IPT, 1984). .....	41
Tabela 3.4 – Classificação do grau de alteração de rochas (modificado de GUIDICINI; NIEBLE, 1976). .....	42
Tabela 3.5 – Graus de alteração segundo ISRM (1981). .....	42
Tabela 3.6 – Classificação de rochas quanto ao grau de coerência (modificado de GUIDICINI; NIEBLE, 1976). .....	43
Tabela 3.7 – Classificação proposta pela ISRM (1981) para resistência de materiais rochosos baseado em valores de compressão uniaxial. ....	44
Tabela 3.8 – Principais propriedades das descontinuidades. ....	45
Tabela 3.9 – Classes de maciços rochosos conforme o parâmetro Q. ....	47
Tabela 3.10 – Principais métodos de investigação de subsuperfície para estudo de estabilidade de taludes e encostas. ....	51
Tabela 3.11 – Valores de Fator de Segurança para obras segundo a ABNT. (modificado de ABNT, 2006). ....	54
Tabela 3.12 – Principais características dos métodos de equilíbrio limite considerados não rigorosos (PACHECO, 2005 apud DE CAMPOS, 1985). ....	55
Tabela 3.13 – Comparação entre grades regulares e malhas triangulares para representar Modelos digitais de terreno. ....	65
Tabela 5.1 – Correlação das classes de resistência utilizadas pela VOGBR e a proposta por Vaz (1996). .....	82
Tabela 5.2 – Parâmetros de projeto fornecidos pela VALE S/A e adotados neste estudo. ....	82
Tabela 6.1 – Valores de RMS individual dos pontos utilizado para validação do MDT. ....	88
Tabela 6.2 – Área de abrangência das bacias da região da mina e entorno. ....	93
Tabela 6.3 – Área e porcentagem referentes às diferentes declividades apresentadas na região. ....	94
Tabela 6.4 – Área e porcentagem referentes aos tipos de curvatura presentes nos taludes e encostas da região. ....	94
Tabela 6.5 – Área coberta e porcentagem com direções de vertente na região de estudo. ....	95

Tabela 6.6 – Fatores de segurança mínimos para diferentes fatores de coesão, ângulo de atrito e nível de água para a seção 3. ....	128
--	-----



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	21
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	23
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	25
3.1	ASPECTOS GERAIS DOS MOVIMENTOS DE MASSA	25
3.2	CLASSIFICAÇÕES DOS MOVIMENTOS DE MASSA	26
3.3	PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES DE MINERAÇÃO	31
3.4	PERFIS DE INTEMPERISMO, HORIZONTES DE SOLO E ROCHA	34
3.5	CARACTERIZAÇÃO E COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	39
3.5.1	<b>Litologia</b>	40
3.5.2	<b>Alteração</b>	41
3.5.3	<b>Coerência</b>	43
3.5.4	<b>Descontinuidades</b>	44
3.6	CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS	45
3.7	MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO NO ESTUDO DE TALUDES	48
3.8	MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE	52
3.8.1	<b>Métodos analíticos</b>	53
3.8.2	<b>Retroanálise</b>	55
3.8.3	<b>Método da projeção estereográfica</b>	57
3.9	GEOPROCESSAMENTO	61
3.9.1	<b>Elementos que compõem um SIG</b>	62
3.9.2	<b>Modelo digital de terreno (MDT)</b>	63
3.9.2.1	Malha regular retangular	63
3.9.2.2	Malha irregular triangular	64
3.9.3	<b>Mapas Temáticos</b>	66
<b>4</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO</b>	69
4.1	LOCALIZAÇÃO	69
4.2	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	70
4.3	GEOLOGIA LOCAL	71

<b>5</b>	<b>MÉTODO E ETAPAS DE PESQUISA</b>	75
5.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	75
5.2	PLANEJAMENTO	75
5.3	LEVANTAMENTOS DE DADOS	76
5.4	CARACTERIZAÇÃO EM ESCALA SEMI-REGIONAL	76
	<b>5.4.1</b> Elaboração da base topográfica digital	76
	<b>5.4.2</b> Validação qualitativa e quantitativa do MDT	78
	<b>5.4.3</b> Mapas temáticos derivados do MDT e mapa litológico	78
	<b>5.4.4</b> Seleção da cava a ser analisada no estudo de detalhe	80
5.5	CARACTERIZAÇÕES EM ESCALA DE DETALHE	81
	<b>5.5.1</b> Definição das seções para o estudo de detalhe	81
	<b>5.5.2</b> Investigações de campo	81
	<b>5.5.3</b> Análises com o emprego de projeção estereográfica	83
	<b>5.5.4</b> Análise pelo método de equilíbrio limite	83
5.6	INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS	83
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	85
6.1	ANÁLISE SEMI-REGIONAL	85
	<b>6.1.1</b> Base topográfica digital e MDT	85
	<b>6.1.2</b> Validação do modelo digital de terreno	85
	6.1.2.1 Validação qualitativa	85
	6.1.2.2 Validação por métodos quantitativos	87
	<b>6.1.3</b> Mapas temáticos	91
	6.1.3.1 Mapa de bacias Hidrográficas	91
	6.1.3.2 Mapa de declividade	93
	6.1.3.3 Mapa de curvatura	94
	6.1.3.4 Mapa de direção de vertente	95
	6.1.3.5 Mapa litológico	95
6.2	ANÁLISE DE DETALHE	96
	<b>6.2.1</b> Levantamentos de campo	96
	<b>6.2.2</b> Levantamento de seções transversais à cava	103

<b>6.2.3</b>	<b>Análise estrutural .....</b>	<b>109</b>
<b>6.2.4</b>	<b>Análises de estabilidade com projeção estereográfica .....</b>	<b>115</b>
6.2.4.1	Rupturas planares .....	115
6.2.4.2	Rupturas em cunha .....	116
6.2.4.3	Rupturas por tombamento.....	118
6.2.4.4	Rupturas circulares.....	120
<b>6.2.5</b>	<b>Análise de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite .....</b>	<b>121</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>129</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>131</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>141</b>
	<b>APENDICE A – MAPA TOPOGRÁFICO</b>	
	<b>APENDICE B – MAPA LITOLÓGICO</b>	
	<b>APENDICE C – MAPA DE CURVATURA</b>	
	<b>APENDICE D – MAPA DE DIREÇÃO DE VERTENTE</b>	
	<b>APENDICE E – MAPA DE DECLIVIDADE</b>	
	<b>APENDICE F – MAPA TOPOGRÁFICO DE DETALHE DA MINA SÃO LUÍS</b>	



## 1 INTRODUÇÃO

Taludes são obras recorrentes de execução em praticamente todos os tipos de empreendimentos geotécnicos. Sua implantação é quase sempre necessária tanto em obras pontuais quanto em obras lineares. Atualmente, o estudo e o controle da estabilidade de taludes e de encostas podem ser relacionados a três grandes áreas de aplicação: construção e recuperação de grandes obras civis; exploração mineral e consolidação de ocupações urbanas em áreas de encostas (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

Dentro deste contexto, a estabilidade de taludes sempre tem sido uma área de estudo bastante investigada por diversos autores a uma longa data. Augusto Filho e Virgili (op. cit.) citam que estudos sobre os escorregamentos datam há mais de 2000 anos em países como China e Japão. Isto tem propiciado o desenvolvimento de estudos nesta área, de forma a compreender e assim evitar ou remediar perdas econômicas e, o mais importante, a perda de vidas. Brabb (1991) estima em milhares de mortes e dezenas de bilhões de dólares de prejuízos por ano, relacionados à deflagração de escorregamentos no mundo inteiro.

A aplicação do estudo de estabilidade de taludes dentro da área de exploração mineral é necessária quando a extração realizada não é subterrânea, ou seja, quando é feito em uma mina a céu aberto, com a escavação de cavas compostas de taludes e bancadas.

Este campo de estudo ganhou importância à medida que a mineração ia se desenvolvendo e ampliando suas atividades. Este desenvolvimento se deu ao passo que novas necessidades iam surgindo e, com o crescente aumento deste setor, as minas de onde os bens minerais são retirados também foram aumentando tanto em quantidade quanto em dimensões.

Contudo, junto com o aumento da demanda, houve um aumento da conscientização da necessidade de garantir a segurança dentro desta atividade, além de realizar o melhor aproveitamento econômico da mina. Para isto é importante que os taludes se mantenham estáveis ao longo da exploração.

Acrescenta-se a estes aspectos, o aumento das restrições e das exigências ambientais para a implantação de empreendimentos de mineração, demandando projetos mais bem elaborados, onde a questão da estabilidade de taludes da cava é, em geral, um componente fundamental.

Em mineração, as condições de segurança exigidas para a estabilidade dos taludes diferem das utilizadas nas demais obras civis (ABRÃO; OLIVEIRA, 1998). Devido ao caráter temporário dos mesmos, são permitidos valores de fator de segurança menores. Entretanto, vários fatores contribuem para a instabilidade, tais como detonações que geram vibrações no maciço, constante tráfego de veículos pesados sobre as bancadas e, geralmente, ausência de vegetação. Estes autores citam ainda outras características peculiares em taludes de mineração, por exemplo, a aceitação de rupturas localizadas, o rebaixamento do nível de água buscando taludes mais íngremes e a possibilidade da experimentação de ângulos de talude a medida do avanço de lavra.

Sendo assim, as análises de estabilidade em taludes de mineração necessitam de uma ampla e abrangente investigação geotécnica das litologias locais, a clara definição prévia dos mecanismos de ruptura potencialmente susceptíveis de ocorrer e os riscos e os efeitos resultantes de uma eventual ruptura. A falta ou inadequação destas premissas pode induzir graves acidentes, com consequências extremamente danosas à continuidade e operacionalidade da lavra (REIS, 2010).

Impulsionada por estas demandas econômicas e técnicas, os métodos de investigação e análise de estabilidade de taludes de mineração encontram-se bastante desenvolvidos e consolidados na Geologia de Engenharia e na Geotecnia. Por outro lado, a utilização das ferramentas de geoprocessamento tem se intensificado nos diferentes campos do conhecimento técnico-científico e áreas de aplicação, e em particular, no estudo de escorregamentos e processos correlatos a instabilização de taludes.

O presente trabalho está voltado ao desenvolvimento de um estudo de estabilidade de taludes em mineração a céu aberto, combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnica.

A pesquisa foi aplicada nas minas a céu aberto de Fazendão, realizando um estudo de detalhe na mina São Luís. Estas minas estão localizadas no município de Catas Altas (MG) e são de propriedade da companhia VALE S/A.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver uma abordagem de estudo para caracterizar a estabilidade de taludes de mineração, aplicando técnicas de geoprocessamento (Sistema de Informação Geográfica – SIG) e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnica.

Como objetivos específicos foram propostos:

- Aplicar a abordagem de estudo em uma cava de mineração a céu aberto;
- Proceder à etapa de investigação semi-regional utilizando diferentes mapas temáticos e analíticos gerados e integrados em ambiente de SIG;
- Proceder à etapa de investigação de detalhe, utilizando dados disponíveis e os obtidos de levantamentos sistemáticos em campo;
- Proceder à análise de estabilidade dos taludes com base em estereogramas e no cálculo de fatores de segurança determinísticos do tipo equilíbrio limite.
- Comparação entre os resultados de diferentes métodos de análise por equilíbrio limite, variando a influência do nível de água e os parâmetros geotécnicos, segundo a classe do maciço.





### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 ASPECTOS GERAIS DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Movimentos de massa, ou movimentos coletivos de solos e de rochas, tem sido objeto de amplos estudos, não apenas por sua importância como agentes atuantes na evolução das formas de relevo, mas também em função de suas implicações práticas (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Para melhor compreender as definições de movimentos de massa, primeiramente faz-se necessário entender os conceitos de encosta e taludes. Segundo Stochalak (1974) as encostas são definidas como “toda superfície natural inclinada unindo outras duas, caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais”.

Talude, de acordo com Wolle (1980), é mais empregado para definir encostas próximas a obras lineares, de mineração etc., tendo um caráter mais geotécnico e relacionado a áreas restritas.

Dependendo da localização espacial do talude, diferentes fatores atuam com diferentes intensidades sobre os mesmos, podendo causar sua instabilização. Alguns dos elementos que atuam em sua estabilidade são: pluviosidade, intemperismo, erosão, presença ou não de cobertura vegetal, geometria do talude entre outros.

Apesar das deflagrações de desestabilização de taludes serem controladas por uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998), é possível identificar fatores que atuam mais diretamente nas ocorrências da instabilização.

Guidicini e Nieble (1976) utilizam os termos agente e causa da instabilização para discutir este tipo de evento. Segundo estes autores, causa seria o modo de atuação de determinado agente no processo de instabilização de um talude. Por sua vez, um agente pode se expressar por meio de uma ou mais causas. Ainda dentro da definição de agente/causa, destacam-se outras duas importantes definições: Agentes predisponentes e agentes efetivos.

Agentes predisponentes correspondem ao “[...] conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais em que o movimento de massa irá ter lugar” (GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p. 36). Enquanto isto, os agentes efetivos são o “[...]”

conjunto de elementos diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa, neles se incluindo a ação humana” (GUIDICINI; NIEBLE, op. cit., p. 36), podendo ainda este último ser subdividido em agentes efetivos preparatórios (aqueles que ocorrem durante um longo período de tempo) e agentes efetivos imediatos (de ação rápida e direta).

As causas “[...] podem ser separadas dependendo de sua posição com relação ao talude”, podendo se então fazer a distinção entre causas internas, causas externas e intermediárias. Causas internas “[...] são as que levam ao colapso sem que se verifique qualquer mudança nas condições geométricas do talude e que resultam de uma diminuição da resistência interna do material [...]”. Por sua vez, causas externas “[...] são aquelas que provocam um aumento das tensões de cisalhamento, sem que haja a diminuição da resistência do material [...]”. Por fim as causas intermediárias, “[...] resultam de efeitos causados por agentes externos no interior do talude [...]” (GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p.37).

### 3.2 CLASSIFICAÇÕES DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Devido à grande variedade de enfoques possíveis na análise de movimentos de massa, existem vários sistemas classificadores propostos por diversos autores. A elaboração e a adoção de um sistema de classificação são importantes para correlacionar os tipos de movimentos com um conjunto de características e os fatores que os deflagraram. Estas características podem ser a geometria do movimento, a área de alcance, os fatores condicionantes do movimento, o material instabilizado, entre outros.

Selby (1990) fez uma compilação dos principais sistemas de classificação de movimentos de massa disponíveis na literatura. Este autor destaca que o primeiro trabalho visando uma classificação sistemática de movimentos de massa foi elaborado por Sharpe (1938).

A classificação de Sharpe (op. cit.) foi realizada utilizando como parâmetros a velocidade do movimento, o tipo de material e a quantidade de água ou de gelo contido na massa, dividindo os tipos de movimentos em duas categorias principais: corridas (*flows*) e escorregamentos (*slides*), estando estas categorias subdivididas em várias outras. (MATTOS, 2009).

Varnes (1978), baseado na classificação proposta por Sharpe, elaborou uma classificação que distingue os diferentes tipos de movimentos, juntamente com o material e a sua quantidade. Augusto Filho (1995) destaca o fato de que a proposta de Varnes (op. cit.) é considerada como a classificação oficial da IAEG (*International Association for Engineering Geology*). A tabela 3.1 apresenta a classificação proposta por este autor.

Tabela 3.1 – Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978).

Tipo de Movimento	Tipo de Material		
	Rocha	Fino	Solo Grosseiro
Quedas	de rocha	de terra	de detritos
Tombamentos	de rocha	de terra	de detritos
Escorregamento Rotacional	abatimento de rocha	abatimento de terra	abatimento de detritos
Escorregamento Translacional	Poucas unidades	de blocos rochosos	de blocos de detritos
	Muitas unidades	de rocha	de detritos
Expansões Laterais	de rocha	de terra	de detritos
Corridas/Escoamentos	de rocha	de terra	de detritos
	(rastejo profundo)	(rastejo de solo)	
Complexos	Combinação no tempo e espaço de 2 ou mais dos principais tipos de movimento		

Hutchinson elaborou duas classificações quanto aos tipos de movimentos de massa. A sua primeira classificação, em 1968, não utiliza o modo de deformação como parâmetro, entretanto faz uma tentativa de englobar todos os tipos de materiais mobilizados pelos escorregamentos.

Em sua segunda proposta de classificação, Hutchinson leva em consideração a deformação como parâmetro. O autor afirma que a diversidade dos fatores que interferem no processo de movimentos de massa gravitacionais resulta em uma variedade de tipos e processos que impossibilitam uma total discretização de tipos na classificação (HUTCHINSON, 1988 apud LOPES, 2007).

Desta forma, este autor considera os seguintes tipos de movimentos: recuos, rastejos, rompimento de taludes de montanhas, escorregamentos, fluxo de detritos, tombamentos, quedas e movimentos complexos de taludes.

No âmbito nacional, as principais classificações são as de Freire (1965), Vargas (1966) e Costa Nunes (1969), todas elas apresentando conotações regionais, voltadas para a ocorrência de movimentos de massa em ambientes tropical e subtropical úmido (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Freire (1965) procura unificar e harmonizar as noções essenciais contidas nas obras de diversos especialistas, classificando os movimentos de solo e de rochas em três tipos fundamentais: escoamentos, escorregamentos e subsidências, descritos a seguir:

- Escoamentos: correspondem a uma deformação, ou movimento contínuo com ou sem superfície definida de movimentação. Subdividem em dois tipos, corridas (natureza fluido-viscosa) e rastejo (natureza plástica).
- Escorregamentos: correspondem a um deslocamento finito ao longo de uma superfície definida de deslizamento, preexistente ou de neoformação. Também dividido pelo autor em dois subtipos, segundo a predominância do tipo de movimento, em rotação e translação.
- Subsidências: correspondem a um deslocamento finito ou deformação contínua de direção essencialmente vertical. Este tipo de movimento, segundo Freire, pode ser subdividido em três tipos: subsidências propriamente ditas (movimento contínuo), recalques (rebaixamento provocado pela expulsão de um fluido provocando rearranjo das partículas sólidas) e desabamentos (deslocamento finito e vertical, geralmente rápido).

A partir do trabalho de Freire (op. cit.), Guidicini e Nieble (1976) elaboraram um texto básico sobre o assunto, analisando os problemas de instabilização de taludes em regiões tropicais, fazendo modificações julgadas pelos autores como convenientes, principalmente quanto à redistribuição das classes de escorregamentos translacionais e fazendo um enfoque na diferenciação entre agentes e causas dos movimentos de massa.

Sendo assim, Guidicini e Nieble (op. cit.) diferenciam 32 classes principais de movimentos, passando a serem caracterizadas de acordo com parâmetros físicos-mecânicos-causais, que são:

- Natureza da superfície de movimentação;
- Inclinação do talude;
- Características qualitativas do movimento;

- Tipo de movimento;
- Velocidade e duração;
- Termos de passagem de um tipo de movimento para outro;
- Causas intrínsecas e extrínsecas, estas últimas divididas em indiretas e diretas, e estas subdivididas em preparatórias e imediatas;
  - Ainda contido no item causas, o modo de ação das mesmas;
  - Natureza física de ações significativas das causas;
  - Efeitos sobre as condições de equilíbrio;
  - Processos corretivos dos movimentos de massa.

Guidicini e Nieble (op. cit., p. 31) ressaltam que “A rigor, subsidências pouco têm a ver com estabilidade de taludes naturais” incluindo este tipo de movimento em seu trabalho, pois, considera que em uma visão mais ampla, as subsidências também representam movimentos de massa ou movimentos coletivos de solo e rocha.

Augusto Filho (1992) apresenta uma classificação baseada nos processos de movimentos de massa, dividida em 4 grandes grupos fenomenológicos, apresentado na tabela 3.2. Seu trabalho propõe um roteiro metodológico, com o objetivo de sistematizar o emprego de técnicas de investigação, caracterização e métodos de estabilização.

Tabela 3.2 – Classificação fenomenológica proposta por Augusto Filho apresentando os principais grupos de escorregamento (modificado de Augusto Filho 1992).

<b>Processos</b>	<b>Características do movimento/material/geometria</b>
Rastejo (Creep)	<p>Vários planos de deslocamento (internos).            Velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade.            Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes.            Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada.            Geometria indefinida.            Poucos planos de deslocamento (externos).</p>
Escorregamentos (Slides)	<p>Velocidades médias (m/h) a altas (m/s).            Pequenos a grandes volumes de material.</p> <p>Geometria e materiais variáveis</p> <p>Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza;            Circulares: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas;            Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza.</p>
Quedas (Falls)	<p>Sem planos de deslocamento.            Movimento tipo queda livre ou em plano inclinado.            Velocidades muito altas (vários m/s).            Material rochoso.            Pequenos a médios volumes.            Geometria variável: lascas, placas, blocos etc.            Rolamento de matacão.            Tombamento.</p>
Corridas (Flows)	<p>Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação).            Movimento semelhante à de um líquido viscoso.            Desenvolvimento ao longo de drenagens.            Velocidades médias a altas.            Mobilização de solo, rocha, detritos e água.            Grandes volumes de material.            Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.</p>

### 3.3 PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO DE TALUDES DE MINERAÇÃO

Segundo Hoek e Bray (1981) os mecanismos de ruptura em maciços rochosos são fortemente condicionados pelas características das descontinuidades (principalmente atitude e persistência) e por suas relações geométricas com o plano do talude.

Barton (1971 apud DIAS, 1996) descreve os mecanismos mais complexos, considerando o efeito de deslocamentos cisalhantes pré-ruptura e a ação do intemperismo em descontinuidades sob tensão de tração, caracterizado por rupturas progressivas. Segundo este autor, tais rupturas envolvem a movimentação do maciço através de um longo período de tempo antes que a ruptura venha realmente a ocorrer.

Hoek e Bray (op. cit.) relatam uma grande quantidade de trabalhos publicados referentes ao assunto, estabelecendo e, em alguns casos, reafirmando os critérios geométricos e cinemáticos que determinam a ocorrência de instabilidade em taludes. Os autores citam que os principais tipos de ruptura são: ruptura circular, ruptura planar, ruptura em cunha e tombamento. A ruptura circular é mais comum em maciços terrosos, enquanto que os outros tipos de ruptura são mais característicos de maciços rochosos. Os modelos dos tipos de ruptura estão apresentados na figura 3.1.

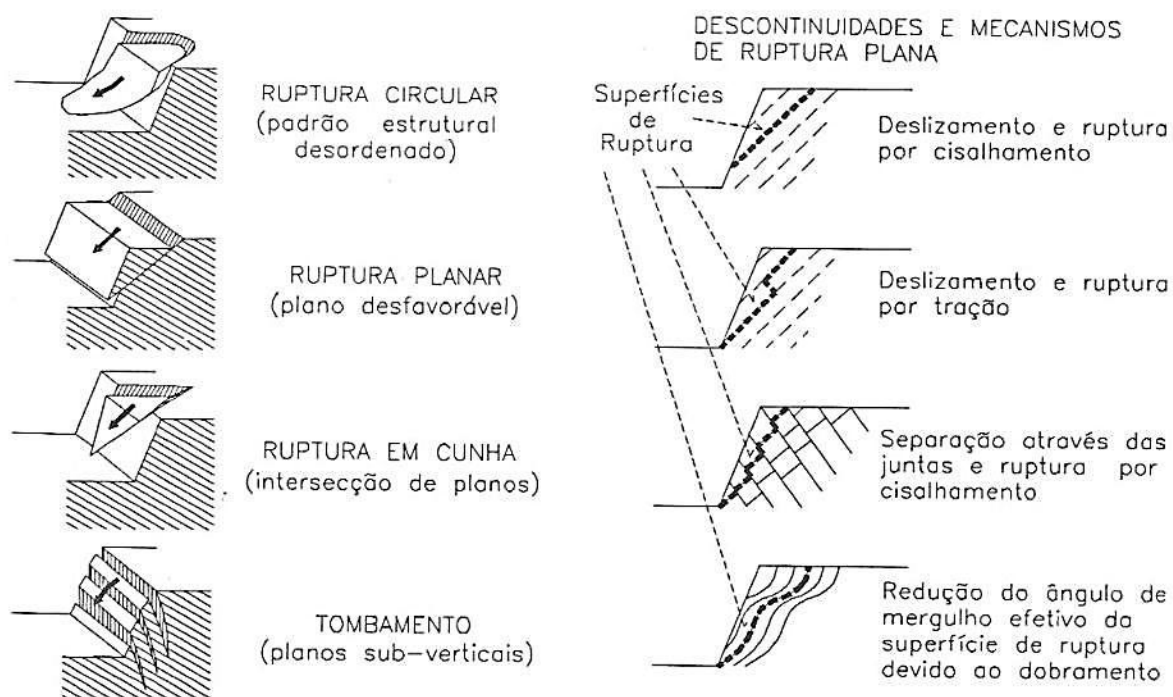


Figura 3.1 – Tipos de ruptura em maciços rochosos e possíveis rupturas planares segundo a descontinuidade presente. (Modificado de HOEK; LONDE, 1974; PITEAU; MARTIN, 1981 apud SERRA JUNIOR; OJIMA, 1998).

A ruptura circular acontece quando o material é muito fraco (como solos). Contudo, este tipo de movimento pode ocorrer em maciços rochosos, quando este se apresenta bastante fraturado ou quebrado, como em pilhas de rejeito. O rompimento ocorre é apenas um plano e tende a percorrer um caminho circular.

A ruptura planar ocorre quando uma descontinuidade que mergulha na direção do talude, intercepta a face do mesmo com um ângulo maior que o ângulo de atrito, como, por exemplo, em um plano de acamamento.

Ruptura em cunha acontece quando duas descontinuidades oblíquas interceptam a superfície do talude, quando a interseção das duas mergulha no sentido do mesmo, com um mergulho maior que o ângulo de atrito.

Tombamento são movimentos originados da rotação de colunas ou de blocos de rocha sobre uma base fixa. Goodman e Bray (1976) subdividem em flexural, tombamento de blocos e tombamento bloco-flexural, visualizados na figura 3.2.

O tombamento flexural ocorre principalmente em taludes escavados em rochas sedimentares estratificadas ou metamórficas foliadas, cujas direções da foliação ou estratificação são praticamente paralelas à direção do talude e mergulham em sentido inverso ao do mesmo. Devido à ação do próprio peso, as lâminas rochosas separadas pelas descontinuidades podem, dependendo do atrito



entre elas, deslizar uma sobre a outra e fletir, até romperem por tração em sua base, finalizando com o tombamento (figura 3.2a).

O tombamento de blocos ocorre quando existem juntas ortogonais espaçadas, individualizando blocos e a direção do talude favorece a queda dos mesmos (figura 3.2b).

Já o tombamento bloco-flexural, ao invés de ruptura de colunas contínuas como no tombamento flexural, este é resultado de deslocamentos acumulados nas juntas transversais, resultando em um termo intermediário entre os dois modos de tombamentos descritos anteriormente (figura 3.2c).

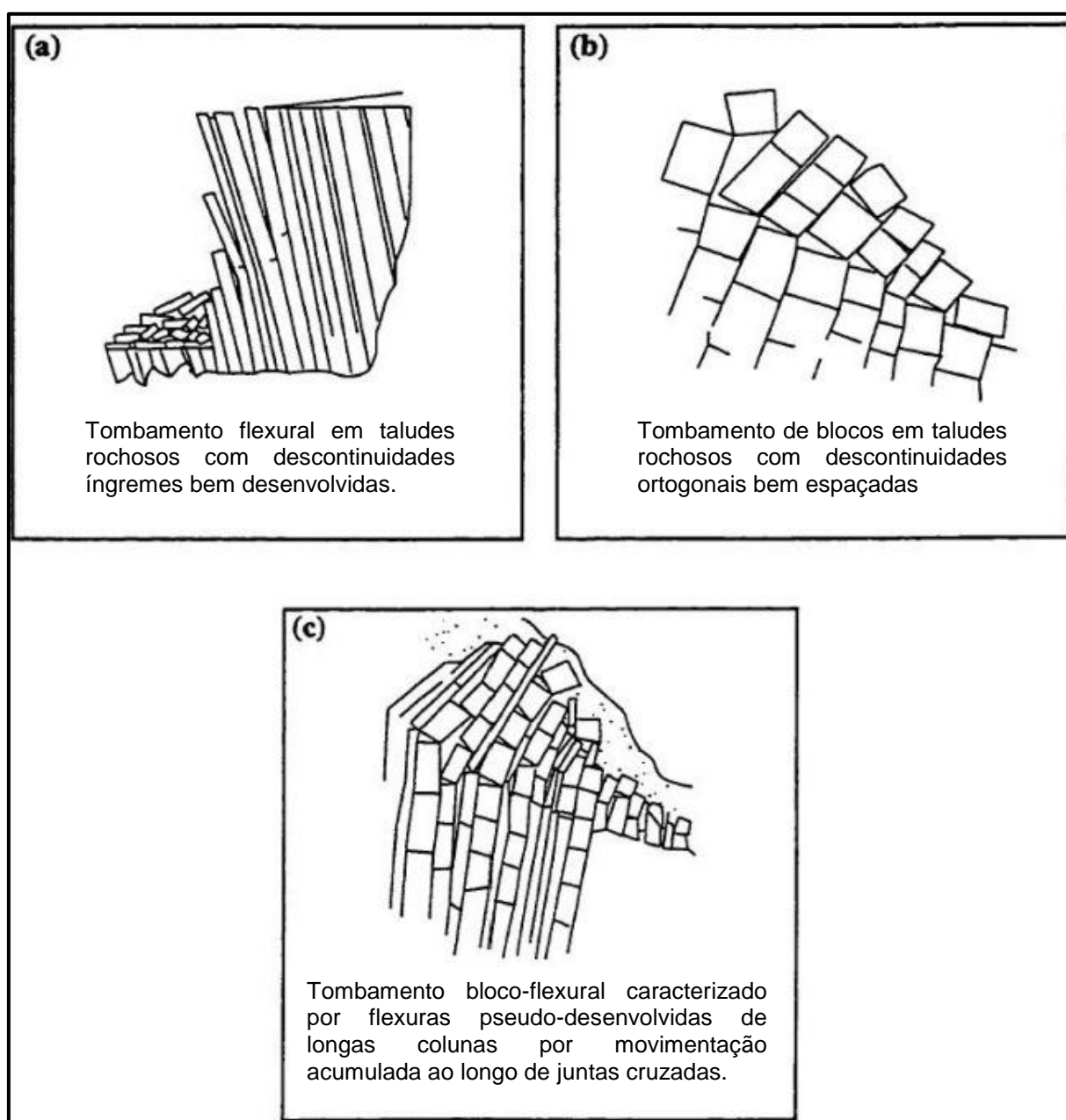


Figura 3.2 – Tipos de rupturas por tombamentos. (a) Tombamento flexural; (b) tombamento de blocos; (c) tombamento bloco-flexural (modificado de GOODMAN; BRAY, 1976).

### 3.4 PERFIS DE INTEMPERISMO, HORIZONTES DE SOLO E ROCHA

Silveira (2002, p. 3) define perfil de alteração como sendo o “[...] produto da interação do substrato rochoso com a atmosfera, biosfera e hidrosfera, tendo como vetor principal de transformação os agentes intempéricos”. Estas alterações variam com o espaço, formando estratos com diferentes propriedades ao longo de um perfil.

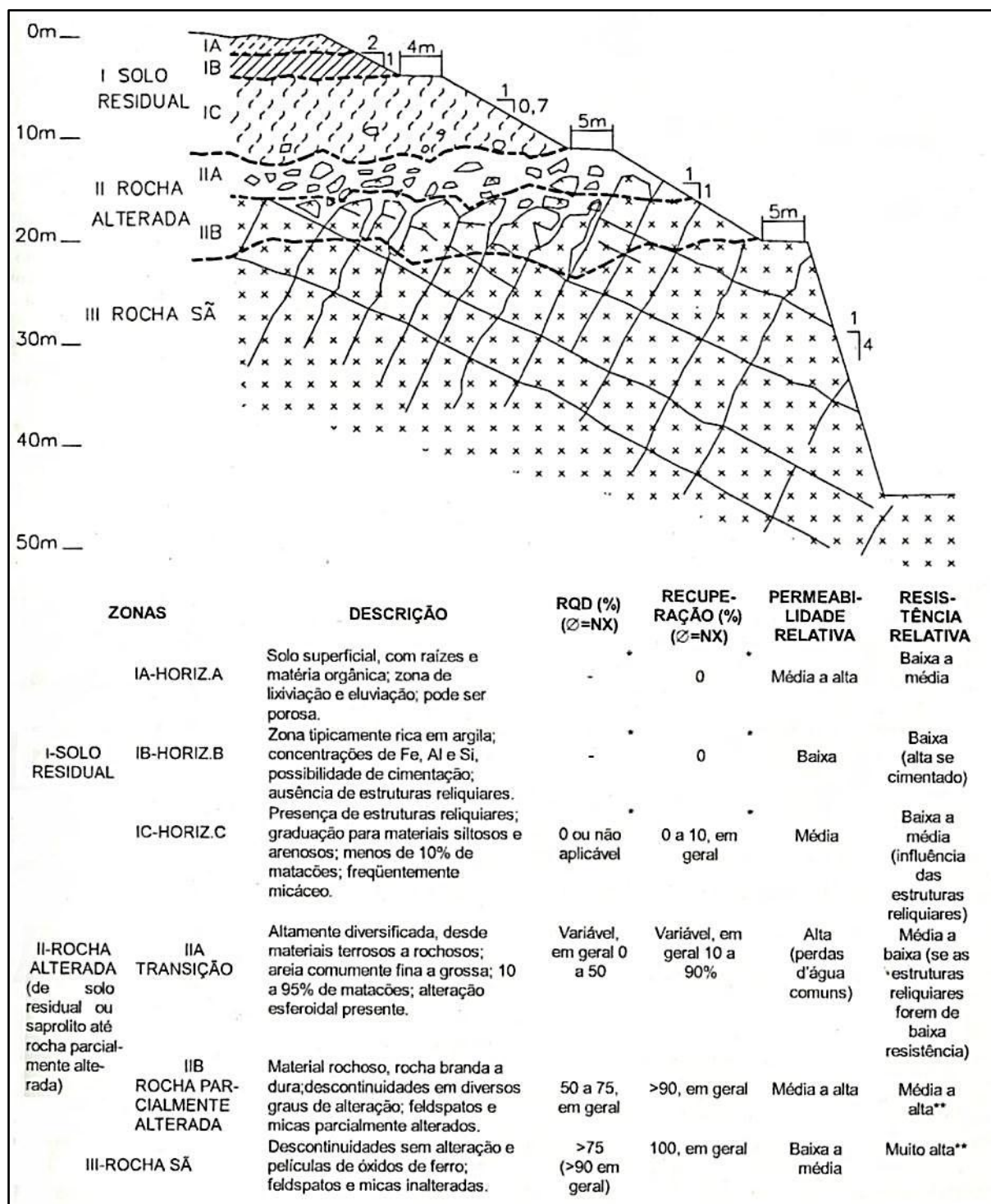
Este autor cita que a primeira tentativa para a classificação de solos tropicais brasileiros foi elaborado por Vargas (1953), subdividindo o perfil de alteração em três unidades:

- Solo residual maduro, argiloso e poroso;
- Solo residual jovem, síltico-arenoso, com estruturas reliquiares da rocha original;
- Rocha alterada, cuja remoção se dava por explosivos.

Posteriormente, Vargas (id., 1974) reformula sua classificação baseando-se em perfis de intemperismo, dividindo em três horizontes de solo e dois de rocha:

- Horizonte I – solo residual maduro;
- Horizonte II – Solo com vestígios de estruturas reliquiares;
- Horizonte III – solos com estruturas de matacões;
- Horizonte IV – rocha alterada com zonas decompostas;
- Horizonte V – rocha sã.

Deere e Patton (1971) definem perfil de alteração como a sequencia de camadas com diferentes propriedades físicas, formadas in situ por processos de alteração física e química. Estes autores apresentam uma classificação com foco na análise de estabilidade de taludes, apresentado na figura 3.3.



\*Descrição de cada zona é a única forma viável de distinção entre elas.

\*\* Considerando apenas o maciço intacto, sem estruturas geológicas com atitudes desfavoráveis.

Figura 3.3 – Classificação proposta por Deere e Patton (1971) focado em estabilidade de taludes (apud AUGUSTO FILHO; VIRGILLI, 1998).

De Mello (1972) apresenta uma classificação associando dois horizontes de solo: e um de rocha:

- Solo maduro, residual ou coluvial;

- Solo saprolítico, com estruturas reliquias da rocha e comportamento intermediário;

- Horizonte de rochas decompostas.

Wolle et al. (1985) reconhecem seis horizontes de intemperismo no total, sendo três de solo, um horizonte de transição e dois de rocha:

- Solo superficial que, quanto a sua origem pode ser residual, coluvionar ou sedimentar;

- Solo residual maduro;
- Solo residual jovem ou solo saprolítico;
- Saprolito (transição solo/rocha);
- Rocha alterada ou decomposta;
- Rocha fresca.

Vaz (1996) propôs uma classificação para perfis de intemperismo em regiões tropicais correlacionando com processos de escavação e perfuração, atividades correntes em geotecnia. Esta subdivisão é feita associando critérios baseados na evolução pedogênica para solos e no grau de alteração mineralógica para rocha. A classificação proposta por este autor é apresentada na figura 3.4. A possibilidade de correlacionar o perfil ao método de escavação torna esta classificação prática e intuitiva de ser usada. Além disto, as classes identificadas por siglas torna sua aplicação mais fácil em perfis de sondagem.

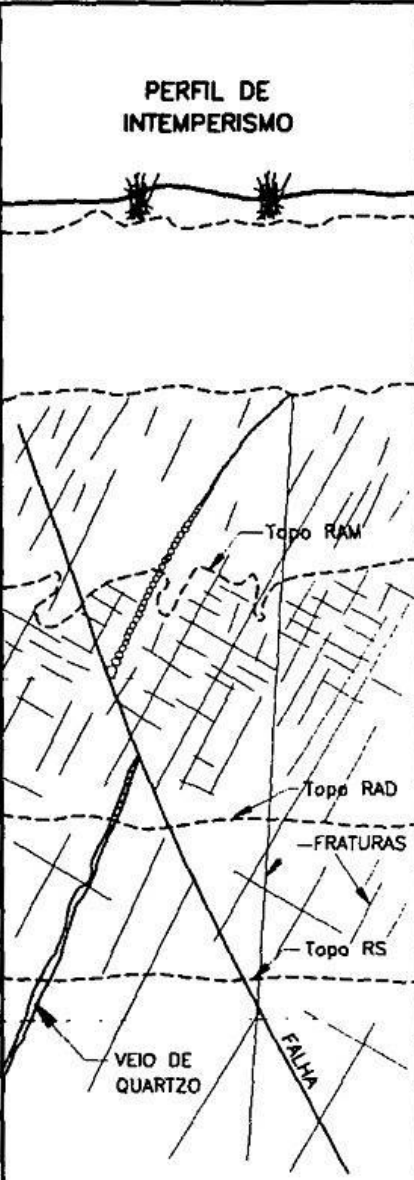
CLASSIFICAÇÃO	CLASSES	PERFIL DE INTEMPERISMO	PROCESSOS	MÉTODOS DE		COMPORTAMENTO
				ESCAVAÇÃO	PERFURAÇÃO	
SOLO RESIDUAL	SOLO VEGETAL		PEDOLÓGICOS	LÂMINA DE AÇO ("SCRAPER", ENXADÃO, FACA) 1a	A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM ↓ IMPENETRÁVEL AO SPT	HOMOGÊNEO ISOTRÓPICO
	SOLO DE ALTERAÇÃO (SA) saprolito					
ROCHA	ROCHA ALTERADA MOLE (RAM)	R3	INTEMP. FÍSICOS	EXPLOSIVO 3a	ROTATIVA	DEPENDENTE DO TIPO DE ROCHA
	ROCHA ALTERADA DURA (RAD)	R2				
	ROCHA SA (RS)	R1				

Figura 3.4 – Perfil de alteração proposto por Vaz (1996) para regiões tropicais.

A classe SE, solo eluvial, é caracterizada por ser um solo homogêneo em relação a sua cor, granulometria e composição mineralógica. Contudo ela pode apresentar alguma heterogeneidade em função de sua evolução pedogênica, mas seu comportamento será de um solo homogêneo e isotrópico para obras civis. Este solo também é conhecido como solo residual maduro, solo superficial e até solo laterítico.

O solo de alteração (SA) caracteriza a camada que ainda se encontra em processo de alteração intempérica. Este solo é sempre heterogêneo em relação a sua cor, textura e composição mineralógica, decorrente da alteração da rocha matriz. Além destas características, as estruturas presentes na rocha mãe

encontram-se preservadas neste horizonte de solo, podendo apresentar planos preferenciais de ruptura.

A rocha alterada mole (RAM) apresentam minerais fortemente alterados e descoloridos, podendo ser escavada manualmente, com ferramentas ou escarificador, ou ainda perfurado pelo processo de lavagem da sondagem a percussão.

A rocha alterada dura (RAD) encontra-se no limite da escavação mecânica, sendo necessária a utilização de explosivos para o desmonte e sondagem rotativa para perfuração. Nesta classe, os minerais apresentam-se levemente descoloridos, sendo mais nítida esta alteração ao longo de fraturas que possibilitam a passagem de água.

A classe RS, assim como a RAD, o processo de escavação é feito através da utilização de explosivos e de perfuração com sonda rotativa. A diferenciação entre as duas é feita principalmente com base na alteração mineralógica, sendo que nesta classe os minerais apresentam-se são ou praticamente são. Em geral, a classe RS também apresenta valores de resistência mecânica mais elevada dentro de um mesmo grupo rochoso.

Vale ressaltar que, além dos solos originados através da alteração da rocha in situ, há solos que foram carregados por algum agente de transporte. Apesar de sua extensa ocorrência no Brasil, a maioria das classificações propostas restringem-se aos solos residuais (VAZ, 1996).

A principal distinção entre os solos transportados é feita a partir do agente de transporte, que são geralmente a água, o vento e a gravidade. Os principais tipos que ocorrem no Brasil são:

- Aluviões: constituídos por materiais erodidos, retrabalhados e transportados pelos cursos d' água e depositados nos seus leitos e margens, ou ainda em fundos e margens de lagoas e lagos, sempre associados à ambientes fluviais.
- Colúvios: constituídos por depósitos de materiais soltos, encontrados no sopé de encostas e que foram transportados pela ação da gravidade.
- Depósitos de tálus: formados pelos mesmos processos de transporte por gravidade, em encostas, que produz os coluviões, diferenciando-se pela presença de blocos de rocha.

- Solos eólicos: são transportados e depositados pela ação dos ventos, composto geralmente por areias quartzosas, apresentando um bom selecionamento, típico de ambiente de dunas.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO E COMPARTIMENTAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

Em maciços terrosos, as principais propriedades que caracterizam a estabilidade são a coesão e o ângulo de atrito. Contudo, outros fatores influenciam direta ou indiretamente, tais como o peso específico, granulometria, índice de vazios, mineralogia, entre outros (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998). Estes maciços são geralmente tratados como isotrópicos e homogêneos.

Nos taludes de maciços rochosos, propriedades como a mineralogia, ângulo de atrito, coesão também possuem influência em sua estabilidade. Entretanto, não são apenas as características da rocha que condicionam a estabilidade dos taludes rochosos. Augusto Filho e Virgili (op. cit.) apontam que os mecanismos de instabilização em maciços rochosos são controlados pelo seu grau de alteração e as anisotropias existentes.

Serra Junior e Ojima (1998) destacam que os maciços rochosos são essencialmente heterogêneos, anisotrópicos e descontínuos, e sua complexidade resulta da evolução geológica a que foram submetidos.

Muller (1959 apud HOEK; BRAY, 1981) e seus colaboradores na Europa enfatizaram por vários anos que o maciço rochoso não é contínuo e seu comportamento é ditado pelas discontinuidades.

A escala da porção do maciço em estudo é que define o quanto ele é homogêneo ou heterogêneo, isotrópico ou anisotrópico, contínuo ou descontínuo, no âmbito de um estudo qualquer (OLIVEIRA, 1981). A figura 3.5 demonstra como a variação da escala de estudo influencia na análise de um maciço rochoso.

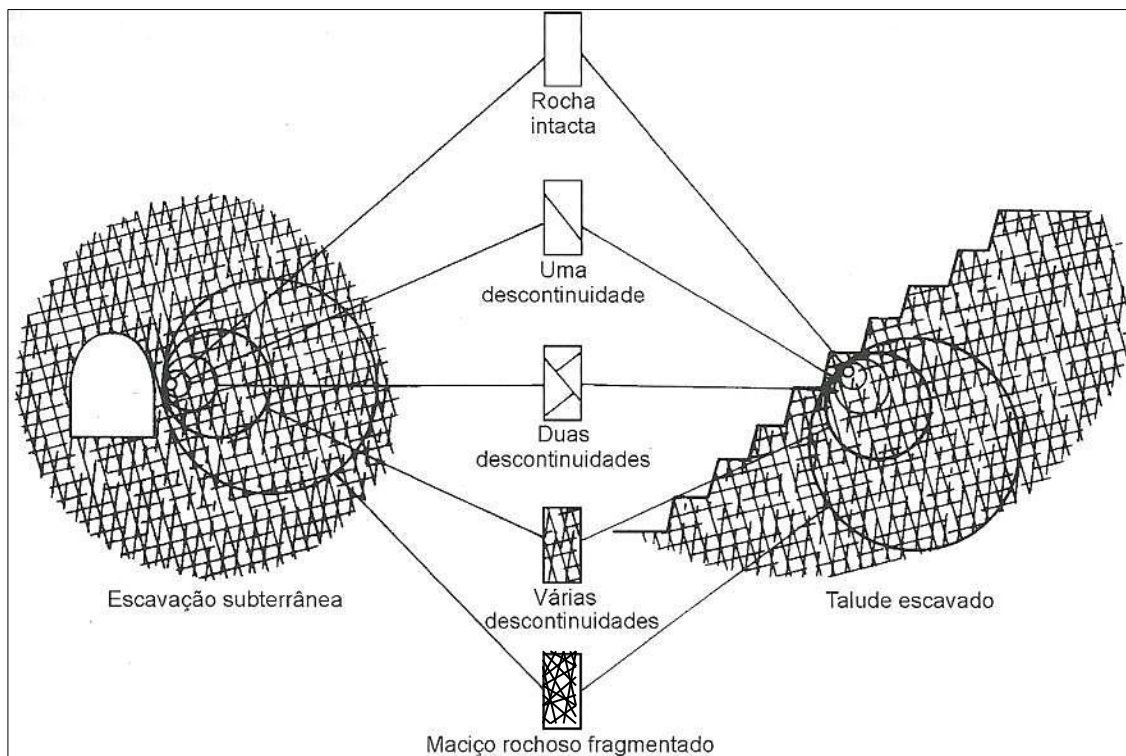


Figura 3.5 – Influência da escala na avaliação de maciços rochosos (modificado de HOEK, 1983).

Algumas propriedades que são importantes agentes de deflagração e condicionantes dos tipos de ruptura em maciços rochosos são regidas pela presença de descontinuidades, tais como a percolação de água, zonas preferenciais de alteração etc.

Sendo assim, Serra Junior e Ojima (1998) destacam que ao estudar um maciço rochoso é importante a realização de uma precisa caracterização geológico-geotécnica, para determinar a história geológica da região e os atributos referentes ao meio rochoso que, isolado e/ou conjuntamente, condicionam ao comportamento do mesmo ante as solicitações impostas.

Determinados fatores traduzem a qualidade do maciço rochoso para receber um empreendimento, com destaque para a litologia, grau de alteração, coerência e as descontinuidades presentes no maciço rochoso.

### 3.5.1 Litologia

Litologia corresponde ao tipo de rocha que compõe o maciço rochoso. Esta classificação é feita a partir de parâmetros como a composição mineralógica, origem e estrutura da rocha.



Contudo, nem sempre a classificação litológica consegue expressar a variedade que uma rocha apresenta em um mesmo local, mas mesmo assim é de grande importância. Isto se deve a particulares relações entre o litotipo e as características do meio rochoso que condicionam seu comportamento quando aproveitado na engenharia (SERRA JUNIOR; OJIMA, 1998).

Algumas rochas apresentam estruturas peculiares devido a sua origem. Resumidamente, diferenciam-se três tipos de rochas: Rochas metamórficas geralmente apresentam estruturas tais como foliação e xistosidade; rochas sedimentares apresentam em sua maioria com baixa coesão e; rochas ígneas apresentam alta coesão.

### 3.5.2 Alteração

Em regiões de clima tropical, como o caso do Brasil, as rochas estão mais susceptíveis a ação do intemperismo, mais especificamente o intemperismo químico. O grau de alteração tem um grande efeito sobre as propriedades da rocha, tais como sua resistência, permeabilidade e dureza, caso o material se permita deformar (SELBY, 1990).

Existem várias classificações para o estado de alteração de uma rocha. IPT (1984) apresenta uma lista com siglas que classificam o grau de intensidade de alteração de um material, que está apresentado na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Classificação do grau de alteração de rochas (IPT, 1984).

Siglas			Denominações	Características da rocha
A1	W1	RS	Rocha sã ou praticamente sã.	Apresenta minerais primários, sem vestígios de alterações ou com alterações físicas e químicas insipientes. Rocha ligeiramente descolorida.
A2	W2	RAD	Rocha medianamente alterada.	Apresenta minerais medianamente alterados e a rocha é bastante descolorida.
A3	W3	RAM	Rocha muito alterada.	Apresenta minerais muito alterados, por vezes pulverulentos e friáveis.
A4	W4	REA	Rocha extremamente alterada.	Apresenta minerais totalmente alterados e a rocha é intensamente descolorida, gradando para cores de solo.

Guidicini e Nieble (1976) discutem que, na literatura, a recomendação é definir o menor número possível de grau de alteração em função de uma avaliação macroscópica das características petrográficas da rocha. Sendo assim os autores propõe três classes de alteração, apresentados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Classificação do grau de alteração de rochas (modificado de GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

<b>Rocha</b>	<b>Símbolo</b>
Sã ou praticamente sã	A1
Alterada	A2
Muito alterada	A3

A ISRM (1981), International Society for Rock Mechanics, por sua vez propõe uma classificação do grau de alteração de rochas dividido em 6 classes. Esta classificação está apresentada na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Graus de alteração segundo ISRM (1981).

<b>Sigla</b>	<b>Denominação</b>	<b>Descrição</b>
W1	Rocha Sã	Alteração mineralógica nula ou incipiente. Minerais preservam brilho e cor original. Resistência original da rocha não afetada pela alteração.
W2	Rocha pouco alterada	Descoloração na matriz rochosa e nas discontinuidades. Alteração mineralógica perceptível e perda de brilho. Resistência original da rocha parcialmente afetada pela alteração.
W3	Rocha moderadamente alterada	A matriz apresenta-se descolorida, podendo ocorrer material mais alterado ao longo das discontinuidades. Resistência afetada pelo intemperismo.
W4	Rocha muito alterada	Matriz totalmente oxidada e cores muito modificadas. Foliação realçada pelo intemperismo. Resistência muito afetada pela alteração.
W5	Rocha completamente alterada	Todo material rochoso é decomposto em solo estruturado. A estrutura original do maciço é ainda largamente intacta.
W6	Solo residual	Material totalmente transformado em solo. Estruturação da rocha matriz destruída.

Fonte: ISRM (1981, apud LOPES 2006).

### 3.5.3 Coerência

Coerência de uma rocha trata-se de um critério subjetivo para avaliar a resistência da mesma, quando não é possível aplicar testes de sanidade (GUIDICINI; NIEBLE, 1976). Através de uma análise qualitativa, são analisados alguns parâmetros físicos como tenacidade, dureza e friabilidade. A tabela 3.6 apresenta a classificação proposta por este autor.

Tabela 3.6 – Classificação de rochas quanto ao grau de coerência (modificado de GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

<b>Rocha</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Características</b>
Friável	C4	Esfarela ao golpe do martelo geológico e desagrega pela pressão dos dedos.
Pouco Coerente	C3	Quebram facilmente pelo martelo geológico, fragmentos com bordas quebradas pela pressão dos dedos, lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.
Coerente	C2	Quebra com relativa facilidade pelo martelo geológico, fragmentos com bordas cortantes cortadas pela lâmina de aço, e superfície riscada por lâmina de aço.
Muito Coerente	C1	Quebra com dificuldade pelo martelo geológico, fragmentos com bordas cortantes não cortados pela lâmina de aço, assim como sua superfície.

Guidicini e Nieble (op. cit.) realçam ainda que determinadas rochas não poderão ser classificadas de acordo com o critério acima, devido as suas propriedades mineralógicas.

A ISRM (1981), por sua vez recomenda uma classificação de resistência para materiais rochosos baseada em valores de compressão uniaxial (LOPES, 2006). Estes valores estão sintetizados na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Classificação proposta pela ISRM (1981) para resistência de materiais rochosos baseado em valores de compressão uniaxial.

<b>Grau</b>	<b>Descrição</b>	<b>Identificação de campo</b>	<b>Resistência (MPa)</b>
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada pela unha.	0,25 - 1,00
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se sob o impacto do martelo de geólogo, pode ser raspada por canivete.	1,0 - 5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por pancada firme com a ponta do martelo.	5,0 - 25
R3	Rocha com resistência média	Não pode ser raspada pelo canivete, amostras podem ser fraturadas com um único golpe do martelo.	25 - 50
R4	Rocha resistente	Amostras requerem mais de um golpe de martelo para fraturar-se.	50 - 100
R5	Rocha muito resistente	Amostras requerem muitos golpes de martelo para fraturar-se.	100 - 250
R6	Rocha extremamente resistente	Amostras podem somente ser lascadas com o martelo de geólogo.	> 250

Fonte ISRM (1981, apud LOPES 2006).

### 3.5.4 Descontinuidades

As descontinuidades são de importância fundamental na análise de um maciço rochoso, pois são as grandes responsáveis por anisotropias neste meio. Segundo ISRM (1978) descontinuidade engloba qualquer feição que interrompa a continuidade física de qualquer meio rochoso. Sendo assim, não apenas as fraturas estão englobadas neste meio, mas também foliações, xistosidades, falhas, acamamento etc.

As propriedades mais importantes das descontinuidades são: orientação espacial; continuidade da estrutura; quantidade volumétrica das juntas; morfologia da superfície da fratura; forma e natureza do preenchimento; abertura entre as superfícies opostas e; a conectividade entre elas (MAGALHÃES; CELLA, 1998).

Scarpelli (1994) destaca que, quando o estudo refere-se à estabilidade de talude em rocha, de todas as propriedades de um grupo de juntas, a orientação das

mesmas com relação à face do talude é a mais importante. Serra Júnior e Ojima (1998) descrevem estas propriedades, resumidas na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Principais propriedades das discontinuidades.

<b>Propriedades</b>	<b>Características</b>
Orientação espacial	Posição ocupada por uma estrutura geológica planar, segundo sua direção e ângulo de mergulho.
Persistência	Extensão em área de uma discontinuidade, medida a partir do traço do plano. A definição de sua dimensão, se grande ou pequena, diz respeito à dimensão do problema em estudo. Este fator tem principal influência na resistência de maciços rochosos, com importância decisiva em certas situações de taludes e fundações em barragens.
Espaçamento	Distância entre duas discontinuidades adjacentes de uma mesma família. Esta característica interfere significativamente no comportamento do maciço rochoso, em relação à deformabilidade, resistência ao cisalhamento e permeabilidade.
Rugosidade	Corresponde a ondulações nas superfícies das discontinuidades, influenciando especialmente a resistência ao cisalhamento, sobretudo quando se trata de discontinuidades não-preenchidas, conferindo um aumento no ângulo de atrito.
Abertura	Corresponde à distância entre as paredes de uma discontinuidade medida no sentido ortogonal. Tem grande importância devido a ser o principal sistema de percolação de água em um maciço rochoso, que facilita a alteração da rocha nestes pontos. Caso a discontinuidade não possua abertura, as propriedades do maciço podem ser equiparadas a do material que o constitui. Se ocorrerem abertas, sua influência poderá ser muito importante caso estejam, preenchidas ou não.
Preenchimento	Descrição do material que preenche as discontinuidades, tendo uma grande influência nos seus parâmetros geotécnicos. É importante na descrição deste material caracterizar sua espessura, a granulometria, mineralogia, textura, cor, e outras informações que se mostrem relevantes.

### 3.6 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

Serra Júnior e Ojima (1998, p. 219) definem classificações geomecânicas como sendo:

[...] sistemas desenvolvidos com base em determinadas características de maciços rochosos, previamente selecionados, de modo a definir diferentes classes de maciço com a finalidade fundamental de subsidiar decisões de engenharia.

Existe uma grande diversidade de sistemas de classificações de maciços rochosos, usados tanto em geologia e mecânica das rochas. Eles são função não apenas dos materiais envolvidos e suas propriedades, mas também da finalidade para as quais foram idealizados. (SCARPELLI, 1994). A maioria das classificações existentes objetiva principalmente a caracterização do maciço para obras subterrâneas.

Terzaghi (1946) foi pioneiro em utilizar uma classificação de maciços rochosos para o projeto de suporte em um túnel, chamando atenção para as características que predominam no comportamento do maciço.

O sistema RMR (Rock Mass Rating) foi proposto por Bieniawski em 1976, e modificado em 1989 em função da experiência do autor e baseado em novas observações. Esta classificação considera os seis parâmetros, descritos a seguir, como sendo os mais significativos na avaliação do comportamento do maciço rochoso:

- Resistência à compressão uniaxial;
- RQD (*Rock quality designation*);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Condições das descontinuidades;
- Ação de águas subterrâneas;
- Orientação das descontinuidades.

A partir da atribuição de pesos em função do nível de variação de cada parâmetro, é realizada uma soma dos valores individuais que define o RMR da rocha. Este valor irá identificar a rocha em cinco classes distintas, desde um maciço muito bom a um maciço muito pobre.

Inicialmente proposta para utilização em obras subterrâneas, alguns autores fizeram adaptações à classificação RMR para utilizá-la na avaliação da estabilidade de taludes. Laubscher et al (1977, 1990) utilizam a classificação de Bieniawski para avaliar o suporte para uma escavação, a escavabilidade do maciço como auxílio na escolha do método de lavra e, ainda, a avaliação do ângulo de talude da cava.

Romana (1985) propõe uma adaptação da classificação de Bieniawski (1979) para taludes. Sua classificação, também conhecida como SMR (Slope Mass Rating) foi desenvolvida para suprir a deficiência da aplicação do RMR para taludes, devido

principalmente às dificuldades práticas de estimar o fator de ajuste para orientação das descontinuidades. (SCARPELLI, 1994).

O sistema Q proposto por Barton et al. (1974) baseou-se na compilação de mais de 200 casos históricos de obras de escavações subterrâneas. Este sistema de classificação possui a vantagem de, entre os sistemas de caracterização quantitativa de maciços rochosos existentes, ser o mais sensível relativo à avaliação da influência das descontinuidades, considerando-o como o fator de maior importância relativa para estimar o comportamento das escavações (SERRA JÚNIOR; OJIMA, 1998).

Este sistema baseia na análise de seis parâmetros, através da equação 1. Os valores são apresentados em uma escala logarítmica e classifica-se o maciço segundo a tabela 3.9.

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) X \left( \frac{J_r}{J_a} \right) X \left( \frac{J_w}{SRF} \right) \quad (1)$$

Onde

Q = Índice correspondente à qualidade do maciço rochoso;

RQD = Índice de qualidade de rocha;

J<sub>n</sub> = Fator referente ao número de famílias de fraturas;

J<sub>r</sub> = Fator referente à influência da rugosidade das paredes das fraturas;

J<sub>a</sub> = Fator referente ao grau de alteração das paredes e material de preenchimento das fraturas;

J<sub>w</sub> = Fator referente à influência da ação da água subterrânea;

SRF = Fator referente à influência do estado de tensão no maciço.

Tabela 3.9 – Classes de maciços rochosos conforme o parâmetro Q.

<b>Padrão geomecânico do maciço</b>	<b>Valores de Q</b>	
Péssimo (excepcionalmente ruim)		< 0,01
Extremamente ruim	0,01	0,10
Muito ruim	0,10	1,00
Ruim	1,00	4,00
Regular	4,00	10,00
Bom	10,00	40,00
Muito bom	40,00	100,00
Ótimo (Extremamente bom)	100,00	400,00
Excelente (Excepcionalmente bom)		> 400,00

Fonte – Barton et al. 1974 – apud Gomes, 1991.

Barton et al. (1974) ressaltam que os pesos atribuídos a cada parâmetro são destinados a obras subterrâneas, podendo não ser adequados a outras obras de engenharia. Os autores recomendam que todos os fatores sejam reavaliados em termos de pesos, mas que os parâmetros RQD, Jn, Jr e Já podem ser básicos para a maioria dos sistemas de classificação (SCARPELLI, 1994).

### 3.7 MÉTODOS DE INVESTIGAÇÃO NO ESTUDO DE TALUDES

Ao lidar com o meio geológico-geotécnico para a execução de obras civis ou estudos de caráter ambiental, é muito importante que, desde o início das atividades, já estejam bem definidas as principais características geológicas da área (SOUZA et al., 1998).

Terzaghi (1950 apud AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998) destaca a importância do conhecimento geológico, como um requisito essencial para a formação de um conceito claro sobre os processos que podem levar ao colapso de um talude.

O objetivo básico da caracterização geológico geotécnica é identificar os agentes, causas e condicionantes atuantes no processo de instabilização existente ou potencial, bem como subsidiar a elaboração dos projetos de recuperação de taludes. (MATTOS, 2009).

Segundo Augusto Filho e Virgili (1998), através da obtenção dos seguintes dados é possível realizar a caracterização geológico geotécnica do processo de instabilização:

- Geometria da instabilização;
- Mecanismo da movimentação;
- Natureza e o estado do material mobilizado;
- Comportamento no tempo;
- Identificação, caracterização e mapeamento espacial das unidades geológico-geotécnicas (compartimentação dos maciços);
- Estabelecimento de correlações entre as unidades mapeadas e o processo de instabilização;
- E, finalmente, previsão dos comportamentos das unidades, ante as solicitações impostas por alguns tipos de obras de contenção.



Augusto Filho (1992) apresenta uma proposta metodológica para o desenvolvimento das investigações envolvendo oito etapas organizadas em uma estrutura de fluxo cíclica apresentado na figura 3.6.

Os ciclos, por sua vez, são controlados pela formulação e avaliação de modelos fenomenológicos do processo de instabilização, sendo modelo fenomenológico um conjunto de hipóteses sobre os principais aspectos do processo de instabilização investigado que melhor explica o comportamento do fenômeno no nível de investigação alcançado. À medida que se avança nas etapas, sofisticam-se os métodos de investigação utilizados, aperfeiçoando o modelo fenomenológico até o nível desejável para a solução do problema (AUGUSTO FILHO, 1992).

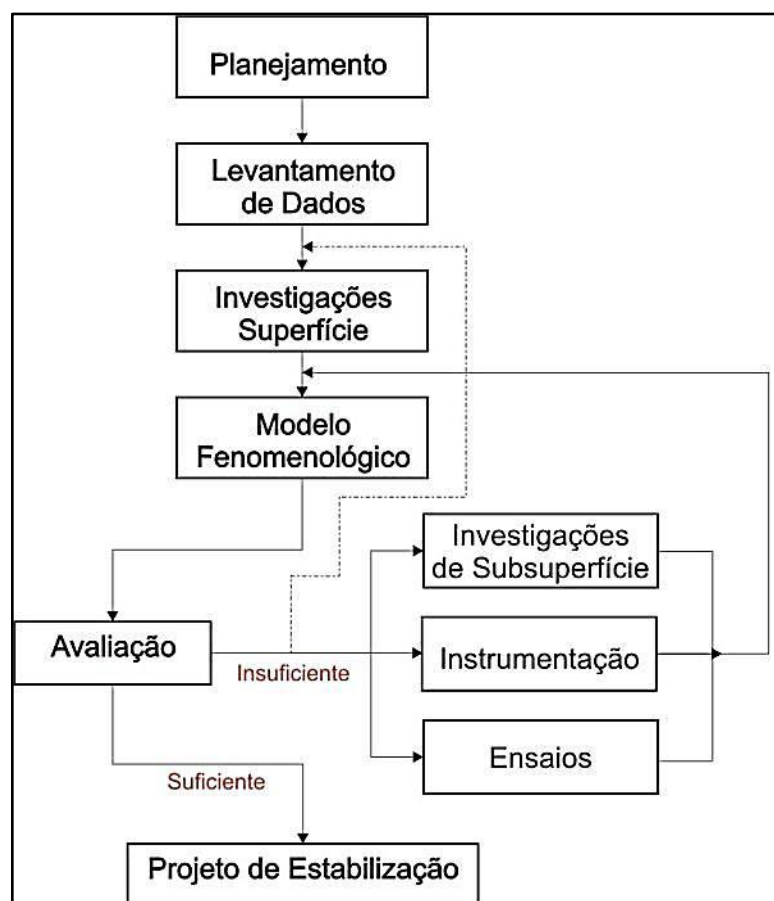


Figura 3.6– Etapas de investigação geológico-geotécnica propostas por Augusto Filho voltado a correção de escorregamentos (modificado de AUGUSTO FILHO,1992).

Gama (1984, p. 95) cita que:

Quando se inicia o estudo de estabilidade de taludes em minas a céu aberto, torna-se necessário estabelecer um plano detalhado que englobe as principais fases do trabalho, dispostas numa sequência racional, que conduza ao objetivo fundamental: o projeto dos taludes.

O mesmo autor acrescenta que (op.cit. p. 95):

Como na mesma mina podem existir taludes com características distintas, é importante definir setores de projeto, cada um dos quais é caracterizado por possuir um tipo de talude que é submetido a uma análise de estabilidade específica.

O mapeamento geotécnico é uma das principais fontes de dados para elaboração do modelo geomecânico no estudo de estabilidade de taludes. Augusto Filho e Virgili (1998) destacam que o estudo de taludes e encosta inicia-se, em geral, pelas investigações de superfície, que servem de base para todos os demais trabalhos.

Os primeiros dados no levantamento de informações sobre talude são referentes à sua geometria. Em seguida, procura-se determinar as características litológicas do maciço, identificando tipos rochosos, zonas de alteração, população de juntas e fraturas e as suas principais características (GAMA, 1984).

Guidicini e Nieble (1976, p. 74) ressaltam que um dos aspectos mais importantes em taludes rochosos, “é a coleta sistemática e a forma de apresentação do levantamento estrutural do maciço, de modo que esses dados possam ser realmente utilizados nas avaliações de estabilidade”.

Entretanto, só o mapeamento não permite a identificação de todas as descontinuidades do maciço. Sendo assim, devem ser utilizados todos os processos de levantamento desta informação (GAMA, 1984).

Como exemplo, as investigações de subsuperfície visam complementar ou esclarecer os mecanismos e os modelos de instabilização do talude, formulados a partir dos trabalhos de caracterização de superfície (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998). A tabela 3.10 apresenta principais métodos de investigação destacados por estes autores.

Tabela 3.10 – Principais métodos de investigação de subsuperfície para estudo de estabilidade de taludes e encostas.

	<b>Tipo</b>	<b>Aplicações/Parâmetros</b>	<b>Limitações</b>
Diretos	Poços, trincheiras e cachimbos.	Acesso direto aos diferentes horizontes em maciços terrosos, amostras indeformadas para ensaios, ensaios de permeabilidade e perda d'água.	Presença de Lençol freático; horizontes resistentes e dificuldade de aeração (poços com profundidades superiores a 10 metros).
	Sondagem a trado (manual e mecânico).	Nível d'água, horizontes em maciços terrosos, amostras deformadas, ensaios de permeabilidade.	Avanço através de camadas de cascalho, lateritas, argilas rijas, blocos rochosos. Rendimento baixo para profundidades maiores que 10 metros (manual) e 30 metros (mecânico).
	Sondagem a percussão.	Nível d'água, horizontes em maciços terrosos e transição solo/rocha, amostras pouco deformadas, ensaios SPT.	Avanço através de blocos rochosos métricos e topo rochoso. Difícil execução em profundidades superiores a 40 metros.
	Sondagem rotativa.	Nível d'água, horizontes em maciços terrosos e rochosos, amostras pouco deformadas, possibilidade de ensaios in situ (permeabilidade, perda d'água).	Custo relativamente elevado.
Indiretos	Geofísicos.	Levantamentos extensivos, extrapolações a partir de algumas investigações de subsuperfície. Identificação do topo rochoso e posição do lençol freático.	Necessidade de algumas investigações de subsuperfície para calibração. Topografias acentuadas e horizontes inclinados podem impor dificuldades no tratamento e interpretação dos dados.

Fonte: Augusto Filho; Virgili, 1998.

Os ensaios, sejam in situ ou em laboratório, visam à determinação das propriedades do material de interesse, seja rochoso ou terroso. Estas características do maciço são então relacionadas aos processos de instabilização.

Maciços terrosos, devido à própria natureza dos solos que são materiais de estrutura frágil e difícil manuseio, necessitam de ensaios laboratoriais especializados. No entanto, na maioria dos casos para meios rochosos, ensaios de campo são suficientes para a estruturação de um modelo viável para a análise de estabilidade (GUIDICINI; NIEBLE, 1976).

Em maciços rochosos, os ensaios geralmente utilizados são: compressão uniaxial e triaxial, ensaios de ruptura a tração e ensaios de resistência ao cisalhamento. Contudo, os ensaios de resistência ao cisalhamento podem ser considerados os mais importantes para análise de estabilidade de taludes, principalmente no caso de maciços compartimentados por juntas, sendo recomendado o ensaio em cada tipo de junta para determinação de sua coesão e ângulo de atrito (GAMA, 1984).

Segundo Guidicini e Nieble (1976), instrumentar um talude significa sistematizar as observações sobre o comportamento do mesmo, independente do meio empregado. Alguns instrumentos que podem ser destacados são: medidores de deslocamentos (marcos superficiais, inclinômetros), de nível ou pressão d'água (tipo Casagrande, piezômetros, densímetros) ou ainda medidores de vazão de água. (AUGUSTO FILHO, 1992).

### 3.8 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A análise da estabilidade de taludes envolve um conjunto de procedimentos visando à determinação de um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude ou encosta se encontra num determinado conjunto de condições atuantes (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

Augusto Filho (1992, p 721) cita que

O grande avanço técnico-científico da geologia de engenharia, da Geotecnia e da engenharia geotécnica, coloca a disposição dos profissionais atuantes na análise e controle dos escorregamentos diferentes técnicas de caracterização geológico-geotécnica e métodos de estabilização.

Segundo Gama (op. cit.), existem diversos métodos de se estabelecer a estabilidade de um talude, uns com maior complexidade e outros mais simples. A decisão de qual método empregar deve ser baseada em função do grau de conhecimento acerca do próprio talude. A seguir são descritos alguns métodos empregados no estudo de estabilidade de taludes.

### 3.8.1 Métodos analíticos

O estudo da estabilidade de taludes iniciou-se com a quantificação dessa estabilidade por meio do cálculo de um fator numérico, que permite avaliar a respectiva segurança. Os métodos analíticos podem ser divididos em dois grupos principais: equilíbrio limite e tensão-deformação.

Gama (1984, p. 15) destaca que

As diferenças entre os dois critérios são consideráveis: enquanto o primeiro necessita de hipóteses acerca do mecanismo de escorregamento que vai afetar o talude, admitindo que ao longo a superfície de ruptura atuam parâmetros conhecidos de resistência ao cisalhamento, e calculando depois o quociente entre a resistência disponível e as forças motoras, o segundo baseia-se no conhecimento das relações tensão-deformação, das resistências residuais ao cisalhamento e ainda do estado de tensão inicial, para determinar, através de métodos numéricos, a distribuição de tensões e de deformações no interior do talude, com as quais é possível estabelecer a forma geométrica do volume sujeito a deslizar e avaliando depois a sua estabilidade.

Os métodos de equilíbrio limite visam calcular um valor, conhecido como fator de segurança (FS), para quantificar a estabilidade de uma encosta. Este valor é obtido pelo quociente entre as forças de resistência e as forças motoras ao longo da superfície de movimentação, conforme a equação 2. Pressupõe que o FS igual a 1, o talude esta na iminência de romper.

$$FS = \frac{\sum F_{Rest}}{\sum F_{Mot}} \quad (2)$$

Sendo FS = Fator de segurança;

$F_{Rest}$  = Forças que contribuem na resistência do talude;

$F_{Mot}$  = Forças motoras que favorecem o rompimento.

A norma NBR 11682 estipula valores de coeficientes de segurança mínimos para a estabilidade de taludes para obras que envolvam atividades nos quais há a possibilidade de perdas de vidas ou prejuízos materiais ou ambientais. Tais valores de segurança estão apresentados na tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Valores de Fator de Segurança para obras segundo a ABNT. (modificado de ABNT, 2006).

Grau de segurança Perdas materiais e ambientais	Grau de segurança - Perdas de vidas		
	Alto	Média	Baixo
Alto	1,5	1,4	1,3
Médio	1,4	1,3	1,2 <sup>(*)</sup>
Baixo	1,4	1,3	1,10 <sup>(*)</sup>

<sup>(\*)</sup> A adoção de fatores de segurança iguais ou inferiores a 1,2 só será permitida quando os parâmetros de resistência do solo puderem ser confirmados por retroanálise, para as condições mais desfavoráveis de poro-pressões.

No caso de estabilidade de blocos rochosos os fatores de segurança podem ser parciais, incidindo sobre  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $C'$ , em função da incerteza sobre estes parâmetros, devendo ser justificado pelo projetista. Deve-se também adotar um fator de segurança mínimo sobre o método de cálculo empregado, igual a 1,1

O método de equilíbrio limite assume como hipótese, na maioria dos casos, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Neste critério a deformação do material não é levada em consideração, sendo as condições de equilíbrio determinadas pelo equilíbrio das forças e dos momentos. Para tal, admite-se que a ruptura se dará em uma superfície preferencial onde a resistência ao cisalhamento será mobilizada pela massa rompida (SÁ, 2010).

Para que o método de análise seja aplicável a casos reais, um dos fatores importantes a considerar é a variação das propriedades do material ao longo do maciço. Para isto, a maioria dos métodos de equilíbrio limite subdivide a região de solo delimitada pela potencial superfície de ruptura em um número qualquer de fatias verticais, analisando-se as condições de equilíbrio das forças atuantes em cada fatia isoladamente (PACHECO, 2005). O método de fatias consiste em dividir a superfície potencial de ruptura em partes menores, aplicando as equações de equilíbrio 3, 4 e 5 a seguir:

$$\sum F.Horizontais = 0 \quad (3)$$

$$\sum F.Verticais = 0 \quad (4)$$

$$\sum Momentos = 0 \quad (5)$$

Para resolver estas equações, é necessário estabelecer algumas hipóteses com o objetivo de simplifica-las. Estas hipóteses é que diferenciam os diversos

métodos, caracterizando-os como mais ou menos conservadores. A tabela 3.12 apresenta alguns dos métodos de análise e suas principais características.

Tabela 3.12 – Principais características dos métodos de equilíbrio limite considerados não rigorosos (PACHECO, 2005 apud DE CAMPOS, 1985).

<b>Método</b>	<b>Hipótese</b>	<b>Tipo de superfície/Comentários</b>
Fellenius (1922)	Desconsidera forças entre as fatias.	Circular.
Bishop Simplificado (1955)	A resultante das forças entre as fatias é horizontal.	Circular: n hipóteses sobre o ponto de aplicação da força normal (n-1) sobre a magnitude das forças tangenciais entre as fatias. O FS é determinado a partir da consideração do equilíbrio dos momentos.
Janbu Simplificado (1968)	A resultante das forças entre as fatias é horizontal. Um fator de correção empírico $f_0$ é usado para levar em conta os efeitos das forças tangenciais.	Qualquer: valores de $f_0$ sugeridos para condições de solos homogêneos. O FS é determinado a partir do equilíbrio das forças.
Janbu Generalizado (1968)	Localização da força normal entre fatias é definida por uma linha de empuxo arbitrária.	Qualquer: n hipóteses sobre o ponto de aplicação das forças normais entre fatias. A posição da última fatia não é usada, o equilíbrio de momentos não é satisfeito na última fatia. O FS é determinado a partir do equilíbrio de forças e de momentos.

Os métodos de tensão-deformação baseiam-se no conhecimento das relações tensão-deformação, das resistências residuais ao cisalhamento e ainda do estado de tensão inicial, para determinar através de métodos numéricos a distribuição de tensões e deformações no interior de um talude (GAMA, 1984).

Enquanto o método de equilíbrio limite é mais simples e tem um caráter semi-empírico, o método de tensão-deformação necessita de um maior volume de dados, entretanto pode modelar com maior exatidão o desempenho dos taludes.

### 3.8.2 Retroanálise

É uma técnica de controle de parâmetros de um sistema, analisando o seu comportamento. Neste método, os sistemas de carga e as propriedades mecânicas do solo ou rocha são determinados em função dos deslocamentos, tensões e medidas de pressão. Este procedimento é oposto ao método de análise ordinário,

onde as condições de carga e propriedades mecânicas do maciço são parte dos dados para a determinação dos deslocamentos, tensões, deformações ou FS (CANCINO CALLE, 2000).

As superfícies de ruptura de taludes muitas vezes são complexas, sendo necessário o conhecimento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em escala real. Tais características dão grande relevância a retroanálise, caracterizando uma das mais confiáveis formas de obter os valores de coesão e ângulo de atrito.

Além disto, a realização de ensaios in situ ou em laboratórios não necessariamente condiz com a situação real do maciço rochoso, devido ao caráter pontual de ambos os métodos de ensaios. A retroanálise se destaca neste quesito, pois é realizado a partir de dados observados da ruptura pré-existente. São então feitos ajustes dos valores de coesão e ângulo de atrito até atingir a condição de ruptura ( $FS = 1,0$ ), permitindo entender melhor as condições necessárias para a ocorrência de ruptura no maciço estudado. Guidicini e Nieble (1976) destacam que a retroanálise é um método apropriado, bastante rápido e de baixo custo, permitindo obter dados de resistência ao cisalhamento a partir de análises de colapsos ocorridos já ocorridos.

Os tipos de parâmetros desconhecidos, obtidos em processos de retroanálise podem ser divididos em três grupos fundamentais: características geométricas, propriedades materiais e condições de carregamento (CIVIDINI; GIODA; JURINA, 1991 apud FRIGERIO 2004).

Hoek (1972, apud JESUS, 2008) aponta que a análise regressiva de rupturas reais, apesar das muitas dificuldades práticas envolvidas, representa um dos campos mais promissores na pesquisa da estabilidade de taludes. Este autor propõe vários de ábacos para retroanálise, baseado em uma série de escorregamentos.

Gama (1984) apresenta um fluxograma com as principais etapas de estudo de retroanálise, apresentado na figura 3.7. Este autor ainda destaca que, para a realização dos estudos de retroanálise, é necessário que rupturas semelhantes tenham ocorrido anteriormente e sejam acompanhadas por critérios técnicos.



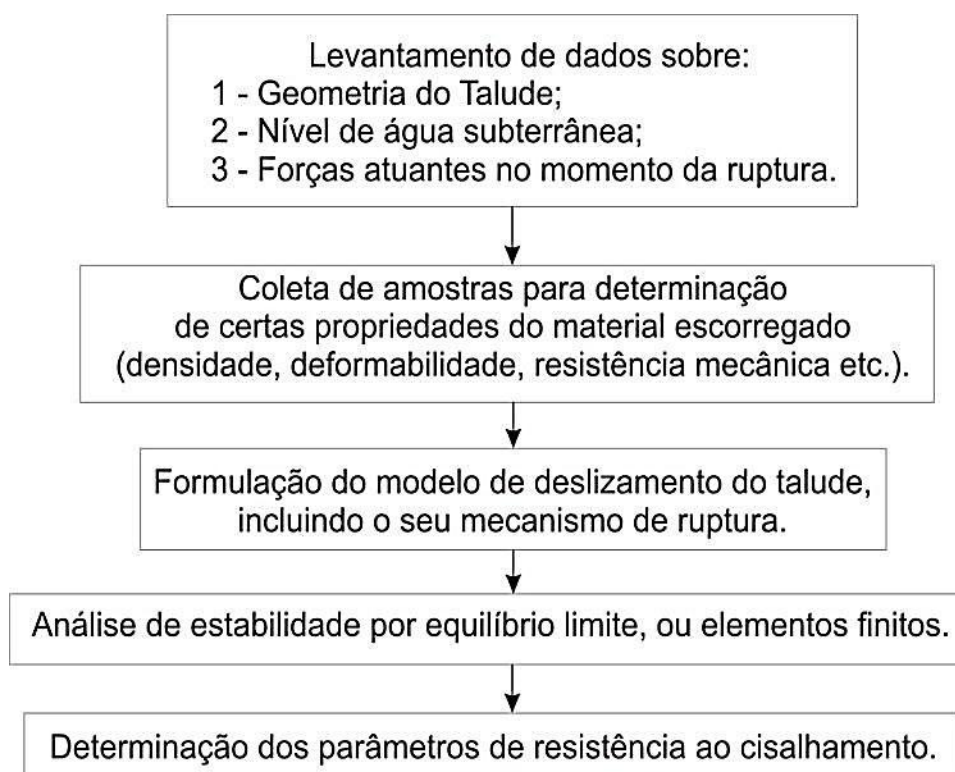


Figura 3.7 – Principais etapas de um estudo de retroanálise segundo Gama (1984).

Cancino Calle (2000) cita que a retroanálise pode ser dividida em dois tipos: métodos analíticos e métodos observacionais. Os métodos analíticos são frequentemente utilizados para melhorar ou refinar a informação disponível relativo à análise de trabalhos complexos (SAKURAI, 1983) enquanto os métodos observacionais são baseados em ábacos de projetos, baseados em observações do comportamento de maciços, sendo obtidos através de gráficos de inclinação versus altura para taludes críticos.

### 3.8.3 Método da projeção estereográfica

Utilizado principalmente em maciços rochosos com estruturas geológicas, a avaliação da estabilidade através do método da projeção estereográfica permite uma avaliação rápida e simples dos tipos potenciais de ruptura (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

Através da utilização de estereogramas é possível representar a relação espacial entre as direções e atitudes das descontinuidades presentes no maciço, assim como a atitude do talude, auxiliando a previsão da geometria mais provável de instabilização para cada situação dependendo da posição das descontinuidades

frente à face do talude. A figura 3.8 apresenta cada tipo de ruptura e sua representação em projeção estereográfica.

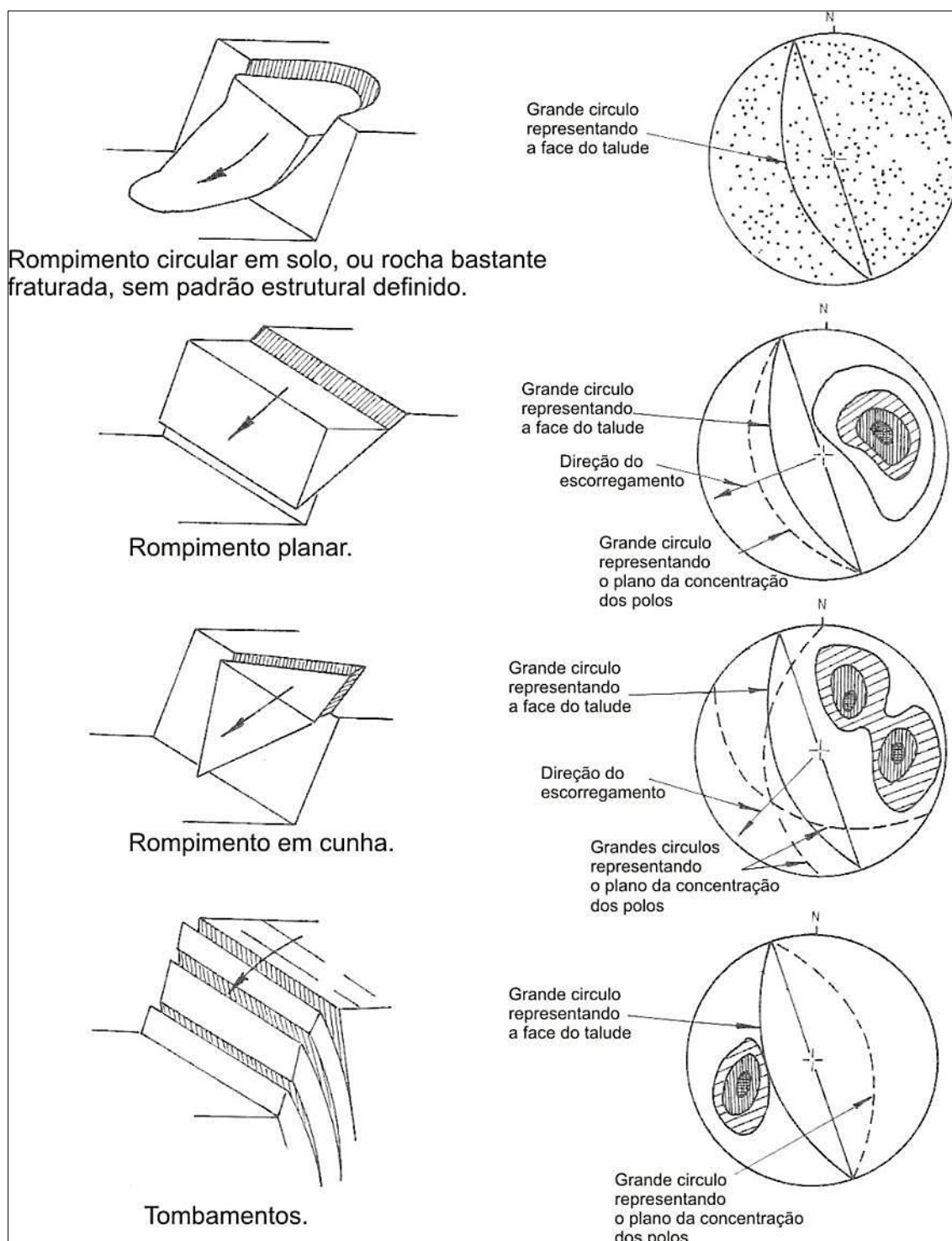


Figura 3.8 – Tipos de rompimento de talude e sua respectiva apresentação em projeção estereográfica (modificado de HOEK; BRAY, 1981).

A ruptura circular é mais comum em solos, contudo, se um maciço rochoso pobre apresentar fraturas sem uma orientação espacial preferencial, este tipo de ruptura também pode vir a ocorrer.

Para que exista a ocorrência de ruptura planar, Hoek e Bray (1981) enumeram os seguintes critérios:

- O plano da descontinuidade no qual o escorregamento irá ocorrer deverá ter direção paralela ou aproximadamente paralela da face do talude, com variação máxima de 20°;
- O mergulho do plano de deslizamento deve aflorar na face do talude, ou seja, ser menor que o ângulo de mergulho do talude;
- O ângulo de mergulho do plano de deslizamento deve ser maior que o ângulo de atrito deste plano;
- Existência de superfícies de liberdade para definir limites laterais para o escorregamento e apresentar resistência desprezível.

Para o movimento em cunha não é obrigatório que o plano de deslizamento esteja subparalelo ao talude, diferentemente das condições para que ocorra o movimento planar. Além disto, o confinamento lateral é imposto apenas pelas fraturas que geram o movimento.

Sendo assim, para que ocorra este tipo de ruptura, é necessário que haja a intersecção de dois planos e que esta intersecção aflore na face do talude. Somado a isto, o ângulo de mergulho desta intersecção deverá ser superior ao ângulo de atrito da linha de intersecção destes planos ( $\Psi_{fi} > \Psi_i > \phi$ ) (HOEK; BRAY, 1981), demonstrado na figura 3.9.

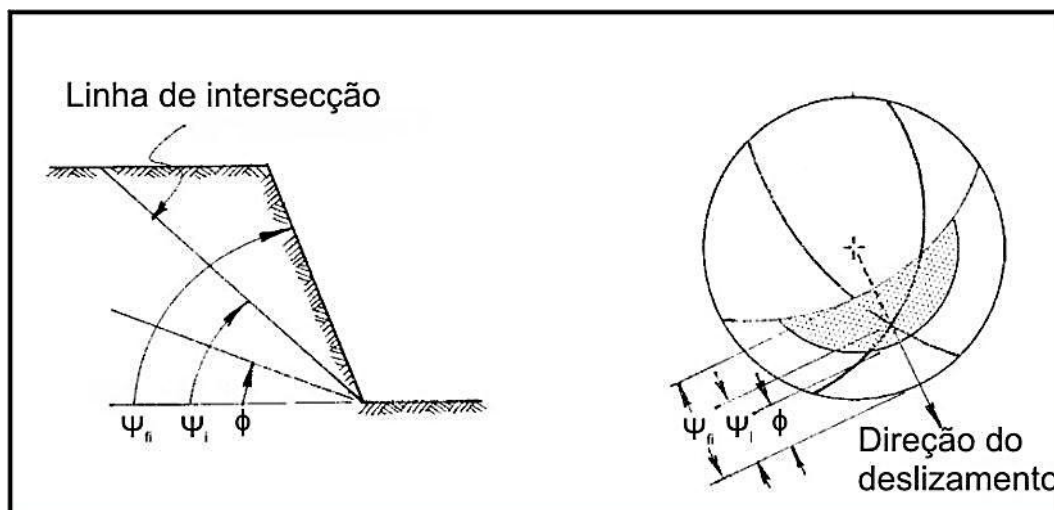


Figura 3.9 – Análise em estereograma para ruptura em cunha (modificado de HOEK; BRAY, 1981).

Tombamentos ocorrem quando há a presença no maciço de feições com mergulho oposto a face do talude, podendo ocasionar a rotação e queda de blocos ou colunas. A análise de ruptura por tombamento é feita a partir da normal dos planos de fratura, conforme sugerido por Goodman (1989).

Este autor indica que, caso as camadas possuam um ângulo de atrito  $\phi_j$ , o deslocamento apenas irá ocorrer se a direção da compressão aplicada possuir um ângulo superior a  $\phi_j$  com a normal da camada. Analisando em projeção estereográfica, o vetor normal do plano precisa ter mergulho inferior a  $\phi_j$ , graus da face do talude. Além disto, é importante que a direção de mergulho da camada seja aproximadamente paralela a direção do talude, estando no intervalo de  $\pm 30^\circ$ . Esta análise cinemática está apresentada na figura 3.10.

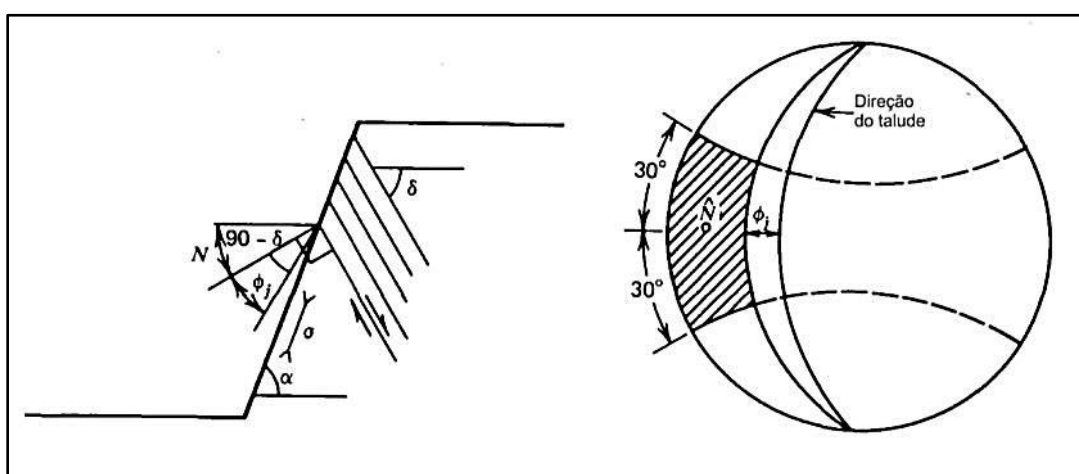


Figura 3.10 – Condições de tombamento ilustradas em corte e estereograma (modificado de Goodman, 1989).

Este método é utilizado geralmente na fase de viabilidade ou na fase de anteprojeto, apontando previamente quais taludes poderão apresentar problemas de estabilidade (SILVA, 2000).

### 3.9 GEOPROCESSAMENTO

Câmara e Davis (2001, p. 1-1) definem geoprocessamento como “[...] a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica [...]”.

As ferramentas computacionais utilizadas em geoprocessamento permitem realizar análises complexas, através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). SIG's, por sua vez, “[...] são sistemas de informação construídos especialmente para armazenar, analisar e manipular dados geográficos [...]” (CÂMARA et al., 1996, p. iii).

Segundo Antenucci et al. (1991), o Comitê Federal de Coordenação Interagências dos Estados Unidos define SIG como um sistema de hardware, software e procedimentos, projetado para apoiar a captura, gerenciamento, manipulação, análise e apresentação de dados, referenciados espacialmente, para solução de problemas complexos de planejamento e gerenciamento. (CELESTINO; DINIZ, 1998).

A grande vantagem da utilização do SIG é a possibilidade de confrontar dados distintos para produzir o resultado desejado. Confrontar mapas com diferentes informações, permitindo gerar um novo mapa é uma ferramenta de grande eficiência quando se trabalhar com informações geográficas.

Isto aliado à facilidade de cálculo dos computadores permite a geração de mapas e informações que dão apoio no planejamento, nas tomadas de decisões e reduz a ambiguidade de interpretações.

Lopes (2007) destaca que

Uma característica básica de um SIG é sua capacidade de tratar as relações espaciais entre os objetos geográficos. Denota-se por topologia a estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que podem se estabelecer entre objetos geográficos. Armazenar a topologia de um mapa é uma das características básicas que fazem um SIG se distinguir de um sistema CAD (computer aided design).

### 3.9.1 Elementos que compõem um SIG

O SIG, de uma forma geral, possui os seguintes componentes: interface com o usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento; visualização e plotagem; armazenamento e recuperação de dados (CÂMARA et al., 1996).

A interface com o usuário é a forma que este irá trabalhar no computador. O primeiro tipo de interface foi a linha de comando, contudo tornava-se complexa a medida que a funcionalidade do sistema crescia. Atualmente, a maioria dos sistemas apresenta-se baseado em menus.

A entrada de dados pode ser realizada nas seguintes formas principais: dados na forma escrita (coordenadas e características), digitalização em mesa, digitalização ótica e a leitura de dados na forma digital. Contudo, ao entrar com as informações a serem trabalhadas no programa, é necessário atentar para a confiabilidade das mesmas, para que o SIG não conduza o usuário ao erro. Informações com coordenadas distintas pode se tornar um erro comum, caso a fonte de diferentes dados não seja a mesma.

As funções de processamento dependem dos dados envolvidos, das funções que o programa fornece e também o que o usuário deseja gerar. Algumas das ferramentas mais comuns estão relacionadas à superposição, ponderação e cálculo de medidas; ferramentas do processamento digital de imagens como contraste, retificação, filtragem e a geração de modelos digitais de terreno - MDT (também conhecido como modelo numérico de terreno - MNT).

Os ambientes de visualização e plotagem diferem de cada programa, alguns apresentando ferramentas avançadas para escolha da área de plotagem e geração de legendas e textos. Por ultimo, é importante que o programa mantenha as informações em um banco de dados, para consulta e utilização em outros projetos.

Câmara et al. (1996, p. 23) relaciona os componentes do SIG da seguinte forma: “[...] as funções de processamento de um SIG operam sobre dados em uma área de trabalho definido pelo usuário. A ligação entre os dados geográficos e as funções de processamento do SIG é feita por mecanismos de seleção e consulta [...]”.

### 3.9.2 Modelo digital de terreno (MDT)

Modelo digital de terreno, também conhecido como modelo numérico de terreno, segundo Câmara et al. (1996, p. 43) “[...] é utilizado para denotar a representação de uma grandeza que varia continuamente no espaço”.

Augusto Filho (2011, p 2) define MDT como sendo um

[...] modelo matemático de uma superfície contínua interpolada por um conjunto de variáveis discretas, definidas por coordenadas de posição em um determinado sistema de projeção cartográfica e por valores de cota em relação a um nível médio de mar considerado.

Entre as aplicações dos usos do MDT, Burrough (1986 apud CÂMARA et al., 1996) cita:

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio e análises de geomorfologia e erodibilidade;
- Análise de variáveis geofísicas e geoquímicas;
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

Particularmente, a topografia é um importante dado inicial para qualquer projeto, onde é necessário ter conhecimento dos limites do terreno, de sua superfície e como esta varia no espaço.

A aquisição de um dado como, por exemplo, valores de cotas de um terreno, são feitas usualmente por um conjunto de amostras pontuais. As amostras adquiridas são selecionadas e organizadas de forma a facilitar a manipulação, com a menor perda de informação possível. As estruturas comumente utilizadas são a grade regular retangular e a grade irregular triangular (SANT’ANNA; NAMIKAWA, 2011).

#### 3.9.2.1 Malha regular retangular

A grade regular é uma representação matricial no qual cada elemento da matriz está associado a um valor numérico. Para gerar a grade é necessário estimar, através de interpoladores matemáticos, os valores para as células que não possuem

medidas, levando em consideração a vizinhança que já possui valores conhecidos (CÂMARA; MONTEIRO, 2001). A figura 3.11 apresenta um modelo de superfície gerada a partir da grade regular.

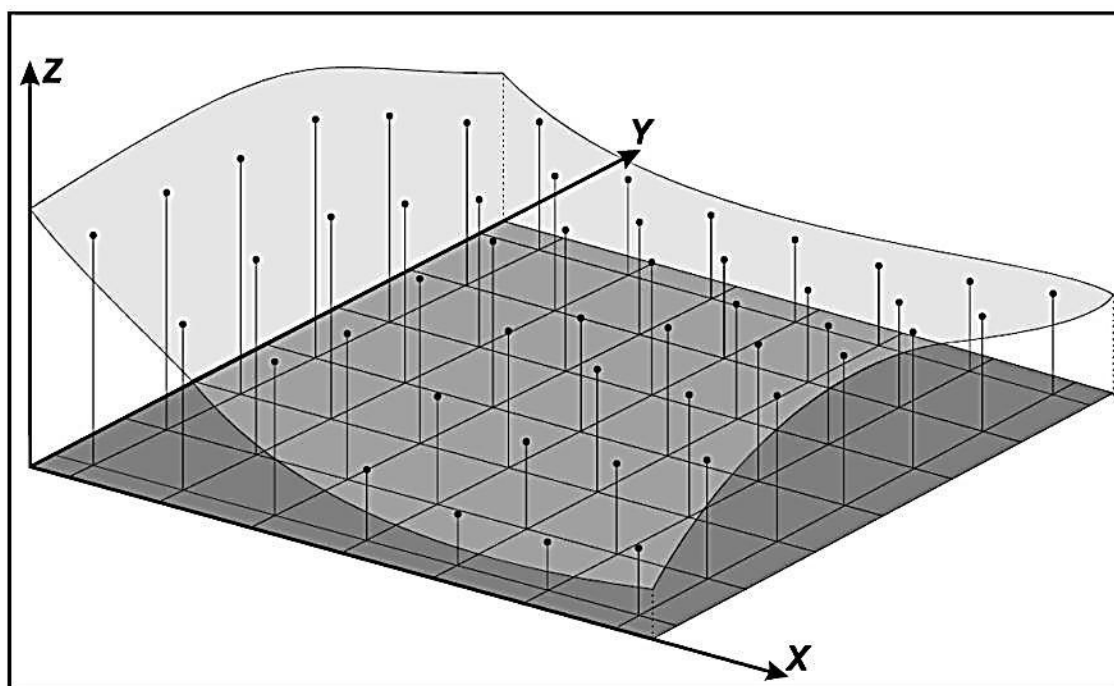


Figura 3.11 – Modelo de superfície gerado a partir de uma grade regular (NAMIKAWA, 1995).

Namikawa (1995, p. 7) cita que um dos defeitos deste tipo de grade é que ele “[...] gera informações redundantes em regiões onde a superfície tem pouca variação e, ao mesmo tempo, falta de informações em áreas de grande variação”. Este erro pode ser minimizado com uma escolha criteriosa dos valores de espaçamento entre pontos da grade. Contudo, este autor reforça que “[...] em superfícies muito heterogêneas, com regiões de grande variação e regiões planas ou quase planas, ou com descontinuidades na superfície [...] nem mesmo a escolha criteriosa permite modelar a superfície com o grau de confiabilidade desejado”.

### 3.9.2.2 Malha irregular triangular

A malha triangular, também conhecida como TIN (triangular irregular network) possui estrutura vetorial e representa uma superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. Em cada vértice do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x, y) e o atributo z, que compõe a superfície (CÂMARA;



MONTEIRO, 2001). Um exemplo de malha triangular irregular está apresentado na figura 3.12.

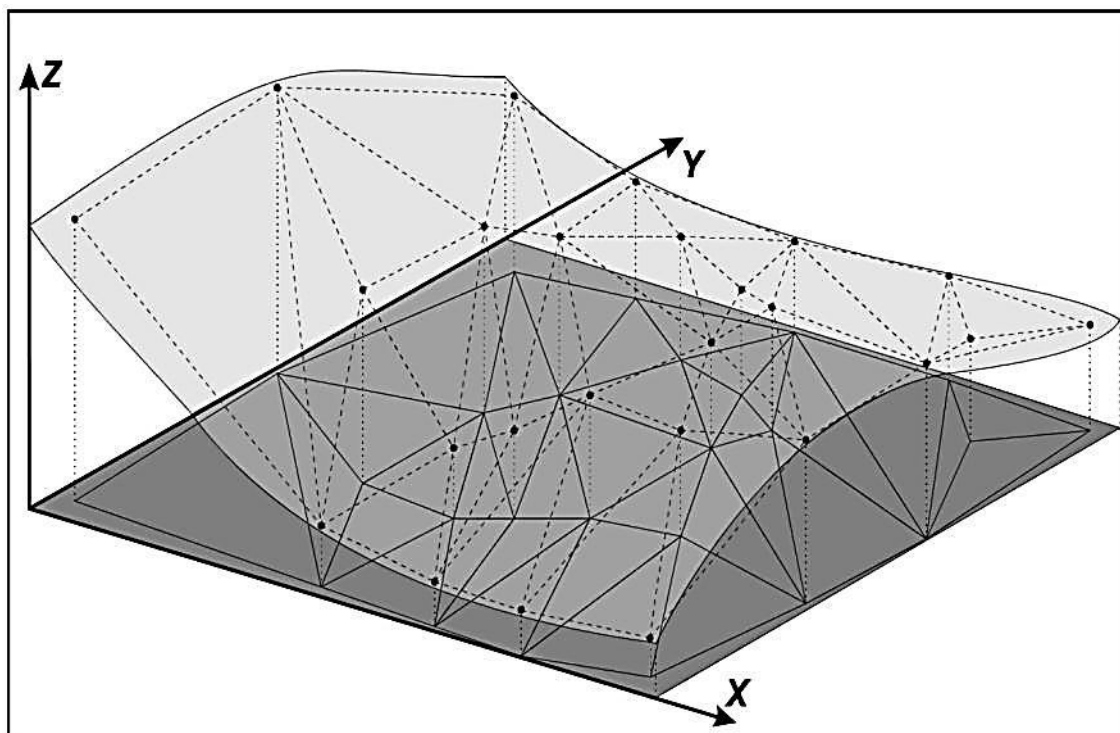


Figura 3.12– Exemplo de uma malha triangular irregular (NAMIKAWA, 1995).

Câmara e Monteiro (2001) estabelece uma comparação entre os dois tipos de malhas, que podem ser resumidos na tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Comparação entre grades regulares e malhas triangulares para representar Modelos digitais de terreno.

	<b>Malha triangular</b>	<b>Grade regular</b>
Vantagens	Melhor representação de relevo complexo. Incorporação de restrições como linhas de crista.	Facilita manuseio e conversão. Adequada para geofísica e visualização 3D.
Problemas	Complexidade de manuseio. Inadequada para visualização 3D.	Dificuldade de representação de relevo complexo. Cálculo de declividade.

Modificado de Câmara e Monteiro (2001)

### 3.9.3 Mapas Temáticos

A partir do MDT, utilizando o SIG como ferramenta, é possível realizar um grande número de análises, dependendo das funções disponíveis no programa utilizado. Algumas que fornecem importantes informações são feitas a partir da interpretação de mapas temáticos, principalmente o mapa de declividade, curvatura e direção de vertente.

Declividade consiste na maior ou menor inclinação do relevo em relação ao horizonte. Na representação em curvas de nível, percebe-se que quanto maior for a inclinação, mais próximas se encontram as curvas de nível. Inversamente elas serão tanto mais afastadas quanto mais suave for o declive (GUERRA; GUERRA, 2006).

Quanto maior a declividade maior será a parcela da componente tangencial do peso do material, favorecendo a instabilização. As declividades mais acentuadas também aumentam a energia cinética da água no escoamento superficial, induzindo o desenvolvimento de feições de instabilização na encosta ou talude (LOPES, 2007).

A classificação das vertentes em relação ao perfil é analisada de acordo com seu valor de curvatura. Este atributo permite compreender, entre outros fatores, as características da drenagem e os processos de erosão e escoamento da região. Isto é feito indicando como o talude ou encosta se comporta, seja como uma superfície concentradora de fluxo (côncava), dispersadora (convexa) ou retilínea. Teoricamente, vertentes retilíneas têm valor de curvatura nulo, vertentes côncavas os têm positivos e convexas têm curvatura negativa (VALERIANO, 2003). Na interpretação do mapa de curvatura, vertentes com valores positivos são côncavas, com valores negativos são convexas e valores nulos são vertentes retilíneas. Porém, vertentes com valores nulos são muito raras na natureza, assim muito pouco do que se julga retilíneo apresenta valor de curvatura realmente nulo, mas sim valores pertencentes a um intervalo de tolerância na vizinhança desse valor (ANJOS; MENEGUETTE; NUNES, 2011).

As curvaturas côncavas são representadas por áreas coletoras de água (saturação e fluxo superficial). As encostas com curvaturas convexas são áreas dispersoras de águas. Já as curvaturas planas não são nem coletoras nem dispersoras de água (LOPES, 2007).

Vertente, em seu sentido amplo é uma superfície inclinada, não horizontal, sem apresentar qualquer conotação genética ou locacional. Dylik (1968) refina esta

definição, denominando vertente como sendo uma forma tridimensional que foi modelada pelos processos de denudação, atuantes no presente ou no passado, e representando a conexão dinâmica entre o interflúvio e o fundo do vale (CHRISTOFOLETTI, 1980).

O conhecimento das direções das vertentes permite também uma melhor compreensão do sistema de drenagem da região, indicando o principal sentido que a água irá percorrer e, no caso de ocorrer movimentos de massas, prever qual o sentido que o material irá percorrer, permitindo a tomada de ações preventivas.

Além disto, caso as direções de encostas mergulhem no mesmo sentido das famílias de descontinuidades podem condicionar a ocorrência de escorregamentos nestes planos (LOPES, 2007).



## 4 ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 LOCALIZAÇÃO

A área em estudo fica localizada na porção centro este de Minas Gerais, no município de Catas Altas. Esta região pode ser acessada, a partir da capital mineira, percorrendo a BR-381 por aproximadamente 70 km sentido Vitória/ES. Então, deve-se contornar no trevo que segue para Barão de Cocais, seguindo a MG 436 por aproximados 26 km. Chegando próximo ao município de Santa Bárbara, continuar sentido a Catas Altas passando pela MG-328 e 129 por mais 25 km. A figura 4.1 apresenta o mapa de localização para a referida área e as principais cidades e vias de acesso da região.

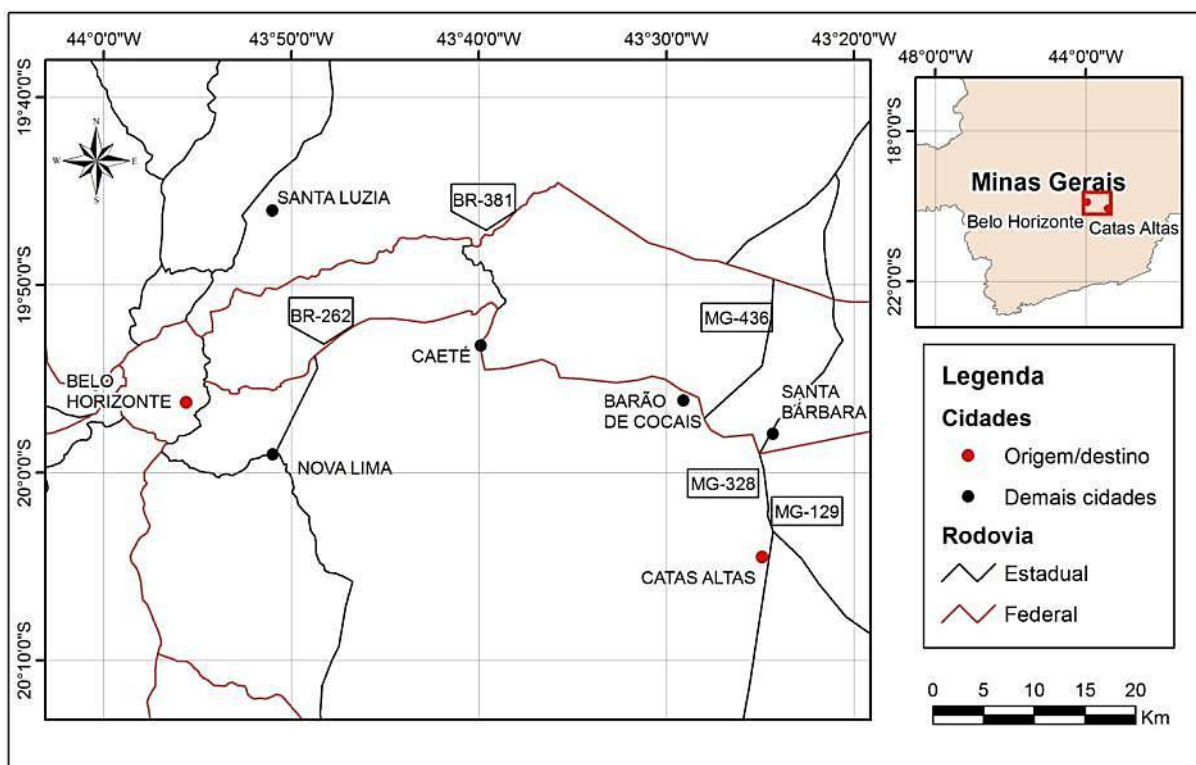


Figura 4.1– Mapa de localização da área de estudo

A mina utilizada neste estudo pertence à Empresa VALE S/A, e está situada no grupo de minas do complexo Mariana, mais especificamente as minas de Fazendão. São ao todo três as minas que compõem Fazendão: a mina de Almas, Tamanduá e a São Luís, que podem ser visualizadas na figura 4.2. Atualmente, apenas a mina de São Luís se encontra em atividade, sendo a maior entre as três.

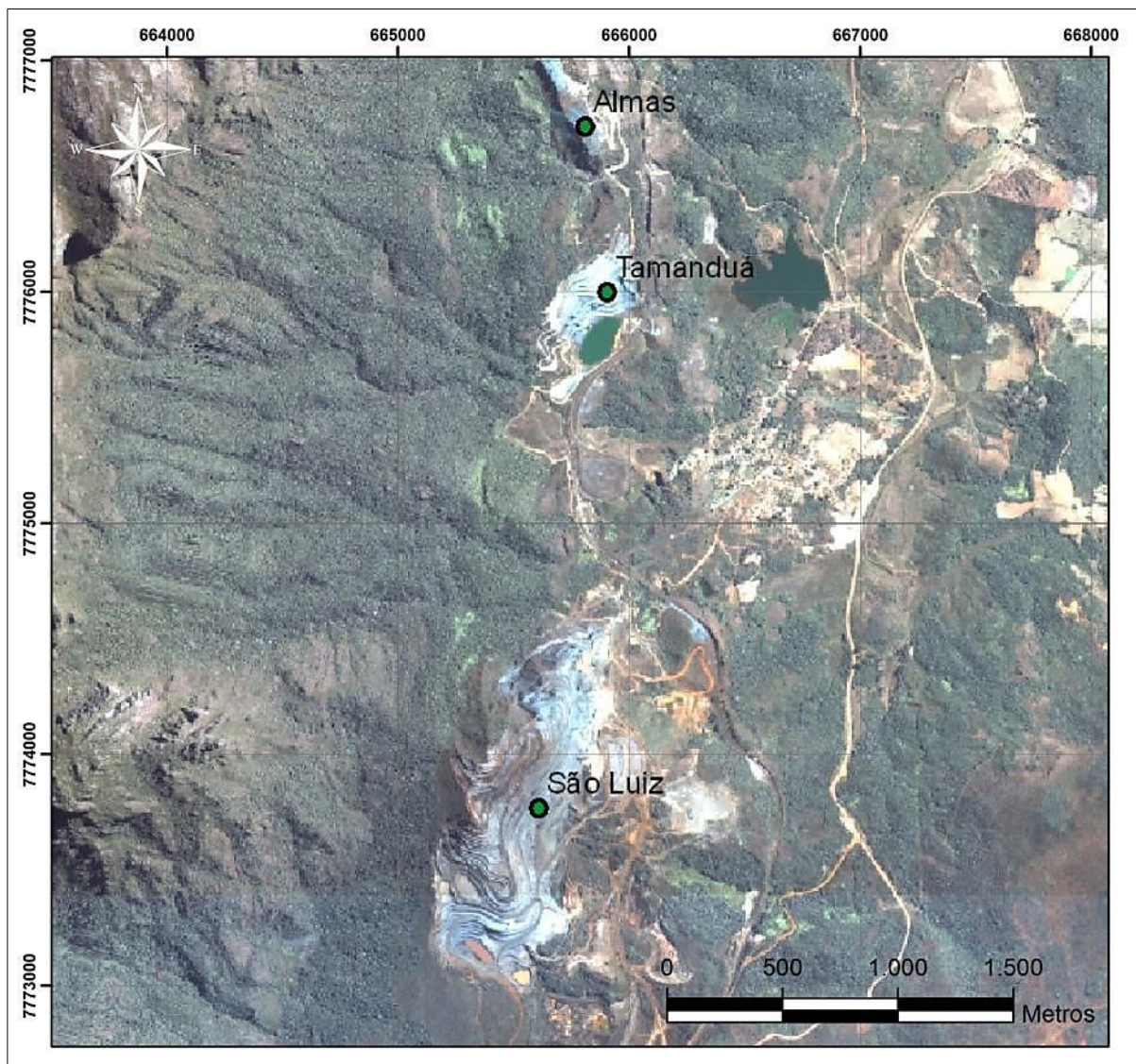


Figura 4.2 – Mapa da região apresentando as 3 minas que compõem o conjunto de minas de Fazenda: Mina de Almas a norte, Tamanduá ao centro e São Luís a sul.

## 4.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Catas Altas está localizada a base da Serra do Caraça, trecho da Serra do Espinhaço, composta essencialmente por quartzitos, atingindo altitudes de até 2070 metros. Devido à elevada altitude, predominam temperaturas amenas durante todo o ano ( $18,5^{\circ}\text{C}$ ), com temperatura máxima média de  $33,9^{\circ}\text{C}$  e a mínima média de  $3,4^{\circ}\text{C}$  (CATAS ALTAS, 2011).

Dutra et al. (2002) destaca outros fatores geográficos importantes da região, tais como forte radiação solar, grande variação de temperatura entre o dia e a noite, constante incidência de ventos e ocorrências de tempestades de raios.

A Serra do Caraça caracteriza-se por ser um divisor de águas, com suas drenagens podendo desaguar à nordeste do córrego São Luís, a sudeste num tributário do Rio Piracicaba, a sudoeste no Córrego das Almas e a noroeste no Ribeirão do Caraça, sendo que este conjunto de drenagens fazem parte da Bacia do rio Doce (DUTRA et al., 2002).

#### 4.3 GEOLOGIA REGIONAL

A área em estudo está localizada no Quadrilátero Ferrífero, situado no extremo sul do Cráton São Francisco contendo abundantes mineralizações de ferro e outros recursos minerais. Segundo Alkmim e Marshak (1998) a litoestratigrafia do Quadrilátero é composta por quatro unidades: Complexos Metamórficos, Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e o Grupo Itacolomi. A coluna estratigráfica do Quadrilátero está apresentada na figura 4.3.

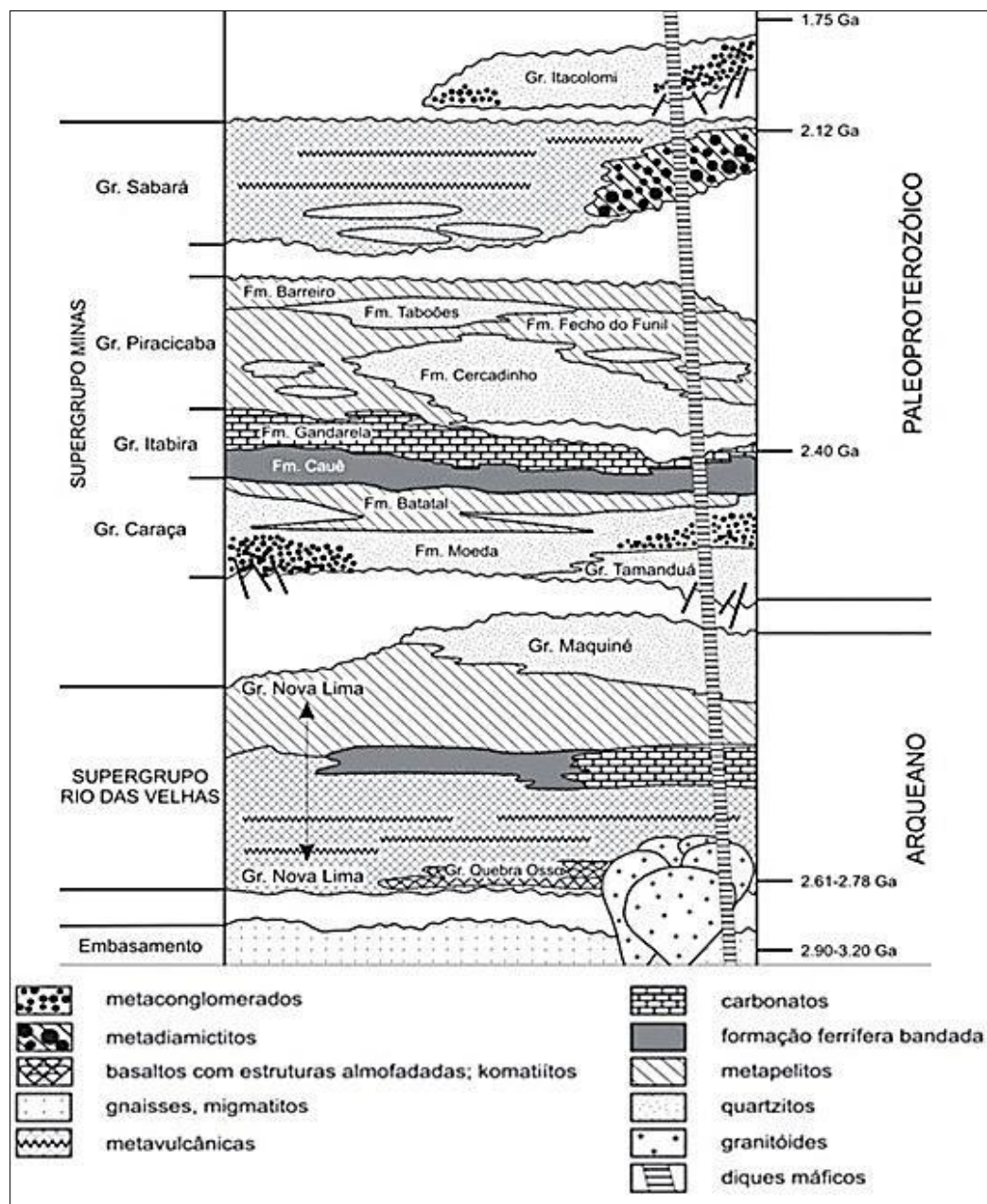


Figura 4.3– Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Modificado de ALKMIM; MARSHAK, 1998).

Na área em questão aflora as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Coberturas Cenozóicas, que geralmente correspondem à canga e depósitos aluvionares. O Supergrupo Rio das Velhas, na região representado pelo Grupo Quebra Ossos, é constituído predominantemente por clorita-talco-xistos com níveis de serpentinitos, representando a clássica sequência de lavas ultramáficas komatiíticas arqueanas do *grenstone belt* do Quadrilátero Ferrífero. Já o Supergrupo Minas pode ser subdividido nos grupos Caraça (Formação Moeda e Batatal), Itabira (Formação Cauê) e Piracicaba Indiviso.



Geneticamente, o Grupo Caraça é composto por sedimentos clásticos depositados em ambiente de caráter fluvial evoluindo para marinho transgressivo e retornando para fluvial, e finalizando com uma deposição em ambiente marinho-plataformal (RENGER et al., 1993).

O Grupo Itabira é formado por sedimentos químicos e carbonáticos depositados em uma fase sedimentar caracterizada por um decréscimo no aporte de material terrígeno.

O Grupo Piracicaba é constituído por sedimentos clásticos e químicos representando um depósito do tipo deltaico originado a partir de uma sequência regressiva interrompida por uma fase transgressiva (MORAES, 1985).



## 5 MÉTODO E ETAPAS DE PESQUISA

A presente pesquisa foi estruturada com base nas abordagens metodológicas gerais de estudo de estabilidade de talude propostos por Wolle (1981), Santos (1981), Gama (1984) e Augusto Filho (1992).

A estas abordagens metodológicas foram incorporadas a utilização de técnicas de geoprocessamento para fundamentar a caracterização e a análise geológico-geotécnica em escala semi-regional do problema de estabilidade investigado. Os trabalhos foram desenvolvidos em seis etapas de estudo, discutidas a seguir.

### 5.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica, contemplando trabalhos de outros autores pertinentes ao tema do projeto de pesquisa. Publicações sobre estudos de estabilidade de taludes e o comportamento dos materiais envolvidos (Hoek e Bray, 1981; Guidicini e Nieble, 1976; Hoek e Londe, 1974, entre outros). Além disto, também contemplou a revisão trabalhos envolvendo o uso de SIG e suas aplicações, como os de Câmara (1996, 2001), Lopes e Augusto Filho (2007) e Augusto Filho (2011).

O principal objetivo desta etapa é consolidar as informações sobre o tema em questão, ampliando o conhecimento sobre o assunto e fornecendo ideias, aproveitando o conhecimento obtido por diversos autores neste campo de estudo.

### 5.2 PLANEJAMENTO

Esta etapa abrangeu a definição da abordagem utilizada neste estudo, as atividades e o detalhamento das investigações a serem realizadas. Devido a esta pesquisa contemplar duas escalas de análise diferentes, também foram programados os estudos a serem realizados especificamente na análise semi-regional e de detalhe.

O foco inicial do trabalho foi ter um conhecimento geral da área onde as minas estavam inseridas, para melhor entender o contexto da região. Desta forma, as primeiras etapas do estudo abrangeram apenas as análises na escala semi-

regional. Assim que a caracterização nesta escala foi concluída, foram iniciadas as análises de detalhe, incluindo a programação das atividades de campo.

### 5.3 LEVANTAMENTOS DE DADOS

Nesta etapa de pesquisa foi realizado o levantamento das informações disponíveis referentes ao tema e à área de estudo. Vários dados relativos à mina foram repassados pela empresa VALE S/A, tais como imagens de satélite, dados de topografia, parâmetros geotécnicos entre outros. Outra fonte importante de dados foi o mapeamento realizado nas minas de Fazendão no período de janeiro a março de 2010 pela empresa VOGBR, dados estes que constituem a base inicial deste trabalho.

Ainda nesta fase foi realizada a organização e tratamento destes dados, com o intuito de separar as informações mais pertinentes aos objetivos da pesquisa. Complementarmente, foram realizadas pesquisas em sites por maiores informações sobre a região, a fim de reunir a maior quantidade de informação de interesse possível.

### 5.4 CARACTERIZAÇÃO EM ESCALA SEMI-REGIONAL

#### 5.4.1 Elaboração da base topográfica digital

A topografia da região da mina fornecida pela VALE S/A não apresentava uma coincidência perfeita, com curvas de nível dentro das cavas representada por pontos cotados definidos pela crista e base de cada talude, curvas de nível espaçadas de 2 em 2 metros na área de entorno da mina e, num contexto mais regional, as curvas eram espaçadas de 5 em 5 metros. Foi necessário então consolidar estes dados de topografia para gerar um único mapa topográfico, na escala 1:10.000, no qual o MDT fosse consistente e servisse de base para todo o estudo, e que não apresentasse nenhuma distorção devido a pequenos desvios.

Primeiramente foram adotadas como referência para a realização dos ajustes as curvas de nível espaçadas de 5 em 5 metros, devido a maior abrangência desta na área em estudo, além de ser a mais adequada a um estudo de caráter semi-

regional. Conseqüentemente, as demais curvas de nível foram adaptadas manualmente, a fim de se obter o melhor encaixe entre as mesmas.

Feita a edição das curvas de nível, foi utilizado o pacote de funções do ArcGIS para gerar a nova base topográfica. Inicialmente foi utilizado o ArcScene para a geração do MDT a partir da função *create TIN from features*. Após isto, este TIN foi transferido para o ArcMap onde foi convertido para o formato *raster* a partir do comando *TIN to Raster*.

Neste passo, e em todos seguintes nos quais foi utilizado o formato raster, tomou-se como padrão o tamanho de célula igual a 1, para obter uma boa resolução na imagem, evitando perder informações que influenciariam no momento de gerar a topografia e os mapas temáticos. Além disto, foi utilizado o comando *filter* que tem por objetivo realizar uma suavização na imagem, reduzindo ruídos existentes.

Posteriormente, foi utilizada a função *contour* para gerar uma base topográfica a partir desta *raster*, com espaçamento das curvas de nível de 5 em 5 metros. Contudo, esta base ainda apresentavam alguns defeitos, como curvas de mesmo valor se interceptando e curvas de nível não suavizadas. Novamente foi realizado um ajuste manual desta topografia removendo estas pequenas incoerências e adaptando, sempre que possível, as curvas de nível originais. Feito estas correções, a partir desta topografia foi gerado novamente um MDT a partir do comando *Topo to Raster*. Este novo MDT foi utilizado para gerar a base topográfica final para a região e os mapas temáticos neste estudo, sem apresentar os defeitos que foram verificados nas bases topográficas anteriores. O passo-a-passo aplicado para gerar a base topográfica está resumido no fluxograma da figura 5.1.

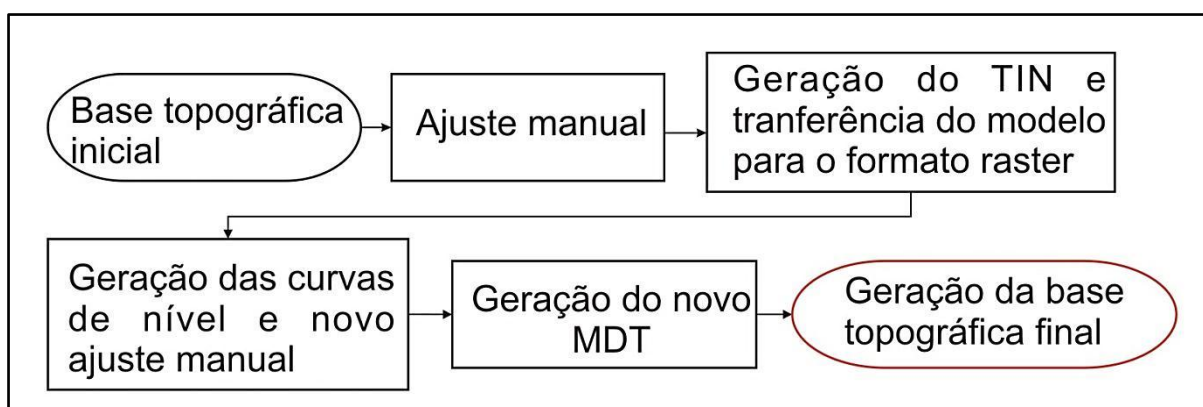


Figura 5.1 – Fluxograma resumindo os passos tomados para a geração da base topográfica utilizada neste estudo.

### 5.4.2 Validação qualitativa e quantitativa do MDT

Para uma análise qualitativa do novo modelo referente às informações iniciais, foram geradas curvas de nível de 5 em 5 metros interpolada do MDT e sobreposta a base topográfica antiga para verificar a compatibilidade das curvas de nível, verificando o encaixe entre as mesmas. Este procedimento é sugerido pelo manual do ArcGIS (ESRI; 2007 apud AUGUSTO FILHO; 2011).

Para realizar uma análise quantitativa, foi estabelecida uma malha de pontos espaçada de 500 metros sobre as curvas de nível originais, cobrindo toda a área de estudo. Para cada ponto desta malha, foram extraídos os valores das curvas de nível iniciais, obtidos sobre a base topográfica, e após os ajustes, utilizando o MDT como referência. Para isto foi empregado o comando *extract values by points* do ArcMap.

Utilizando estes dois dados, calculou-se o *Root Mean Square Error* (RMS) ou média quadrática, para avaliar o desvio da nova topografia em relação a original. Este cálculo foi realizado através da equação 6 (SILVA, 1999).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (Z_0 - Z_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$Z_0$ : Valor de cota da topografia original;

$Z_i$ : Valor de cota obtido do MDT;

N: Número de pontos amostrados.

### 5.4.3 Mapas temáticos derivados do MDT e mapa litológico

A caracterização semi-regional foi realizada analisando mapas temáticos que foram confeccionados a partir do MDT utilizando o pacote de funções disponíveis no ArcGIS 9.3 e de dados fornecidos pela VALE S/A. O intuito foi analisar os efeitos destas feições nesta escala de trabalho, e assim identificar regionalmente os diferentes comportamentos ao longo da área de estudo, segundo estes critérios.

Para a delimitação das bacias hidrográficas e a rede de drenagens foi empregado o pacote de funções do ArcGIS – *Spatial Analyst - Hydrology*. Inicialmente foi utilizado o comando *Fill*, sobre o MDT com o objetivo de preencher

depressões e remover picos, erros constantes no modelo devido à resolução dos dados topográficos de entrada. Para gerar as bacias de hidrográficas, foi utilizado como dado de entrada este MDT corrigido, e aplicando sobre ele a função *Basin*.

As drenagens da região foram delineadas utilizando o procedimento descrito a seguir. Inicialmente foi gerada uma imagem raster com as direções de fluxos, a partir do comando *Flow direction*. A seguir, foi utilizado o comando *Flow accumulation* que calcula quantas células estão fluindo para dentro de cada outra célula. Para isto foi usado como dado de entrada o resultado da ferramenta *Flow direction*. Por fim, para gerar a imagem raster da rede de drenagens foi utilizado o mapa de fluxo acumulado a partir da ferramenta *map algebra*. Utilizando a expressão 7:

$$\text{streamnet} = \text{setnull}(\text{flowacc} < 5000, 1) \quad (7)$$

Neste modelo, células que possuíam 5000 ou mais células “fluindo” para ela receberam o valor 1 e as demais não assumiram nenhum valor. Este resultado foi balizado com a topografia e a imagem de satélite da região. O modelo de rede de drenagem elaborado foi analisado em conjunto com a topografia e a imagem de satélite para região, além da rede de drenagem disponível inicialmente.

O mapa de declividade foi gerado utilizando a ferramenta *Slope* do ArcGIS. A declividade foi separada em 3 intervalos distintos: declividade baixa (0° a 17°), declividade moderada (17° a 30°) e alta declividade (30° a 72°).

Para o mapa de curvatura foi aplicado a ferramenta *Curvature* do ArcGIS. Para a individualização das superfícies planas foi considerado o intervalo contido entre 1% do valor máximo e mínimo de curvatura encontrado para a área.

Utilizando a ferramenta *Aspect* foi obtido o mapa de direção de vertente que mostra o fluxo descendente em cada célula. A figura 5.2 apresenta um fluxograma com os passos adotados para a geração dos mapas temáticos.

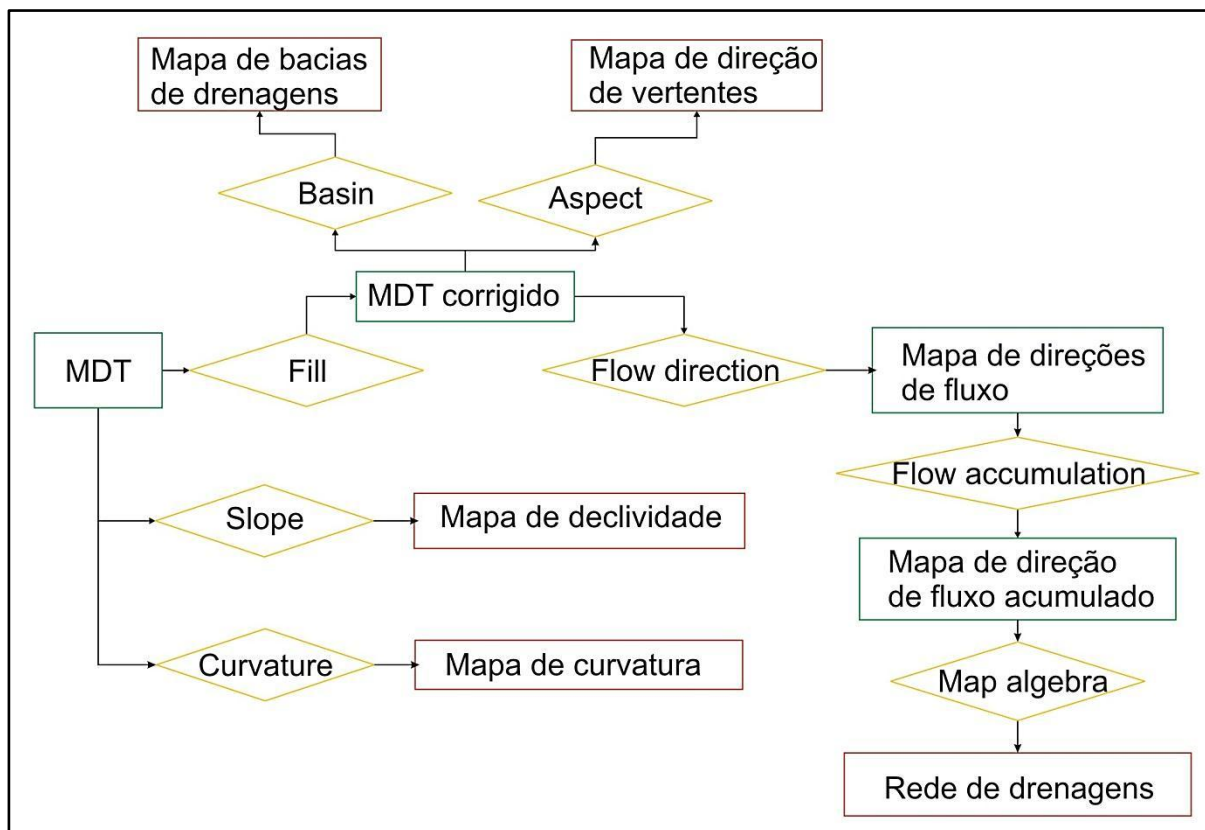


Figura 5.2 – Fluxograma apresentando os passos para geração dos mapas temáticos.

O mapa litológico semi-regional foi gerado a partir do mapa litoquímico fornecido pela VALE S/A juntamente com as informações obtidas durante o mapeamento das cavas.

#### 5.4.4 Seleção da cava a ser analisada no estudo de detalhe

Entre as três minas do complexo, a mina de São Luís foi a escolhida para ser analisada em detalhe. Esta seleção foi baseada nos resultados dos mapas temáticos e, principalmente, a partir das informações coletadas durante o primeiro campo realizado. Alguns dos critérios que podem ser destacados são:

- Maior mina do complexo;
- Apresenta diferentes direções de vertentes, ou seja, maior variação na direção dos taludes podendo ser analisadas diferentes seções com ângulos de taludes diferentes;
- Única mina em atividade no período que esta pesquisa foi realizada, consequentemente apresentando os taludes e bancadas em melhores condições;



- Mina que apresenta a maior quantidade de dados estruturais adquiridos;
- Apresenta valores de declividades mais elevados.

## 5.5 CARACTERIZAÇÕES EM ESCALA DE DETALHE

### 5.5.1 Definição das seções para o estudo de detalhe

Para o estudo de detalhe foram definidas três seções, com o objetivo de cobrir toda a extensão da mina São Luís. Estas seções foram traçadas perpendicularmente as direções de taludes possibilitando a realização de análises sobre o comportamento das principais descontinuidades presentes no maciço, considerando algumas das diferentes direções de taludes que ocorrem ao longo da mina em questão.

### 5.5.2 Investigações de campo

A segunda etapa de campo teve foco no mapeamento de seções pré-estabelecidas na mina de São Luís, objetivando realizar um estudo de estabilidade de taludes. Foi utilizada a classificação do perfil de alteração proposta por Vaz (1996) e também foi concretizada a verificação da correlação proposta entre esta classificação e a realizada pela VOGBR, que trata-se de uma adaptação da classificação de ISRM (1981), com o intuito de padronizar os dados. Esta correlação está apresentada na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Correlação das classes de resistência utilizadas pela VOGBR e a proposta por Vaz (1996).

Classificação adotada pela VOGBR (adaptado de ISRM 1981)		Classificação de Vaz (1996)			
Classe	Descrição	Classe	Descrição	Método de	
				Escavação	Perfuração
R0	Solo estruturado coesivo, rijo a duro.	SE	Solo eluvial	Lâmina de aço	Trado ou percussão
		SA	Solo de alteração, saprolito.	Lâmina de aço	Trado ou percussão
R1	Rocha muito branda (friável) - saprolito	SA	Solo de alteração, saprolito.	Lâmina de aço	Trado ou percussão
		RAM	Rocha alterada mole	Escarificador	Percussão com lavagem
R2	Rocha branda	RAM	Rocha alterada mole	Escarificador	Percussão com lavagem
R3	Rocha medianamente resistente	RAD	Rocha alterada dura	Explosivo	Rotativa
R4	Rocha resistente	RAD	Rocha alterada dura	Explosivo	Rotativa
R5	Rocha muito resistente ou extremamente resistente	RS	Rocha Sã	Explosivo	Rotativa

Os parâmetros geotécnicos utilizados foram baseados nos relatórios de Geoestrutural (2005), e estão resumidos na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Parâmetros de projeto fornecidos pela VALE S/A e adotados neste estudo.

Litotipo	Classe Maciço (Bieniawski, 1974)	Classe de alteração (Vaz, 1996)	Peso Específico (KN/m <sup>3</sup> )	Envoltória de Resistência Efetiva			
				Paralelo à Foliação		Oblíquo à Foliação	
				C' (KN/m <sup>2</sup> )	φ' (Graus)	C' (KN/m <sup>2</sup> )	φ' (Graus)
Formação	V	RAM	30	30	30	80	38
Cauê (Itabiritos Silicosos)	IV	RAM/RAD	30	30	32	150	40
	III / II	RS	30	-	-	300	45

### **5.5.3 Análises com o emprego de projeção estereográfica**

A partir dos dados coletados em campo das estruturas presentes no maciço foram confeccionados estereogramas das estruturas geológicas apresentando as principais direções das juntas e dos planos de bandamento e foliação. Baseado nas interações destas estruturas com os planos de talude principais foram avaliadas as possibilidades de ocorrências de instabilidades, segundo os métodos propostos por Hoek e Bray (1981) e Goodman (1989).

### **5.5.4 Análise pelo método de equilíbrio limite**

Para análise de ruptura pelo método de equilíbrio limite foi selecionada uma seção dentre as três realizadas. Esta seção foi escolhida utilizando as informações obtidas durante as etapas de campo, objetivando simular uma situação mais crítica para o estudo.

Foram utilizados os programas WinStabl e Slide para as análises, considerando 3 cotas piezométricas distintas devido à escassez de dados de nível de água na área. Para o WinStabl foram pesquisadas 50 superfícies de ruptura, sendo que o programa indica as 10 mais críticas. Já utilizando o Slide, a pesquisa de superfícies de ruptura foi mais abrangente, atingindo até 5000 superfícies diferentes. Os fatores de segurança para ambos os programas foram calculados a partir do método de Janbu simplificado. Em seguida foi comparado o resultado entre este método e o de Bishop.

## **5.6 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS**

Com base nas informações existentes, nos dados de campo levantados e os mapas temáticos utilizando SIG, foram discutidos os resultados obtidos na escala de semi-detalle e as principais características da mina estudada em detalhe. Foi verificada a distribuição espacial dos atributos investigados e as principais questões envolvendo a estabilidade dos taludes a partir de dois métodos distintos, além de apontados e discutidos os principais processos de instabilização e os fatores condicionantes dos mesmos.

Além disto, foi avaliado o método empregado na obtenção do mapa topográfico e os resultados obtidos através dos estereogramas e por equilíbrio limite, com o objetivo de analisar o método de pesquisa empregado. Em sequência, os dados gerados foram avaliados no sentido de apontar ângulos de taludes críticos e direções dos mesmos que contribuem para a perda de estabilidade, identificando as principais condições para a ocorrência da instabilização e os processos correspondentes.

Por fim, foi verificada a aplicabilidade da abordagem utilizada, levando em consideração as principais características do método de análise em questão.

## **6 RESULTADOS**

### **6.1 ANÁLISE SEMI-REGIONAL**

#### **6.1.1 Base topográfica digital e MDT**

A partir do procedimento de edição da base topográfica disponível, foi elaborado um novo MDT para a região. O processo de edição e adequação das curvas de nível produziu um MDT contínuo, sem variações abruptas de cotas como ocorria ao longo das junções das diferentes topografias fornecidas.

A partir deste novo MDT, foi elaborada a base topográfica para a área de estudo, na escala de 1:10.000 e espaçamento entre as curvas de nível de 5 em 5 metros. Esta base topográfica está apresentada no apêndice A.

#### **6.1.2 Validação do modelo digital de terreno**

##### **6.1.2.1 Validação qualitativa**

Os resultados obtidos a partir do método de validação qualitativa do MDT, baseado na comparação visual entre as curvas de nível originais e as interpoladas a partir do MDT, está ilustrado na figura 6.1.

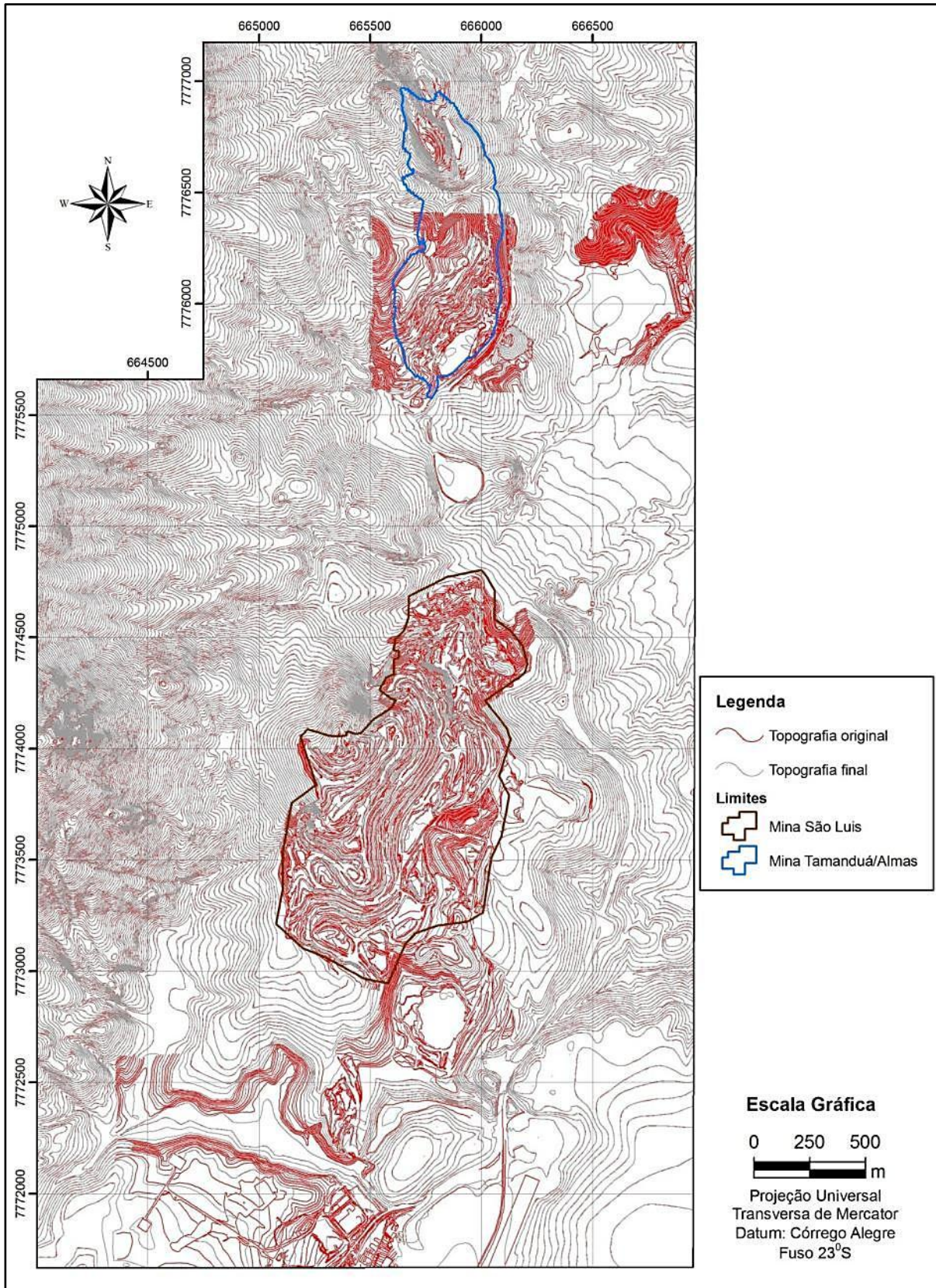


Figura 6.1 – Dados iniciais de topografia iniciais e a interpolada pelo MDT na escala 1:10.000 com espaçamento de 5 metros.

A figura mostra uma boa coincidência do traçado entre a topografia original e a interpolada a partir do MDT, sendo que alguns pequenos desvios são provenientes apenas pelo processo de suavização das curvas de nível. Devido à adoção do espaçamento de 5 metros entre as curvas para efetivar esta análise, em algumas áreas não foi possível realizar esta verificação, já que existe a diferença entre o espaçamento dos dados topográficos iniciais em diferentes áreas do mapa.

A boa adequação com os dados iniciais foi devido à realização de ajustes sempre priorizando a coincidência com as curvas de nível originais. Soma-se a isto a escolha da topografia base para os ajustes ser aquela com maior abrangência na região em estudo.

#### 6.1.2.2 Validação por métodos quantitativos

Foram calculados os valores de RMS individual para cada um dos 59 pontos cobrindo toda a área do MDT. Estes valores estão resumidos na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores de RMS individual dos pontos utilizado para validação do MDT.

<b>Ponto</b>	<b>Cota Original (m)</b>	<b>Cota MDT (m)</b>	<b>RMS Individual</b>	<b>Ponto</b>	<b>Cota Original (m)</b>	<b>Cota MDT (m)</b>	<b>RMS Individual</b>
1	1040,000	1039,947	0,053	31	850,000	849,962	0,038
2	1060,000	1060,106	0,106	32	1055,000	1054,433	0,567
3	875,000	874,892	0,108	33	965,000	964,751	0,249
4	810,000	809,999	0,001	34	1043,000	1043,939	0,939
5	1070,000	1069,870	0,130	35	940,000	940,956	0,956
6	940,000	940,004	0,004	36	870,000	869,825	0,175
7	860,000	860,023	0,023	37	895,000	895,332	0,332
8	785,000	784,973	0,027	38	975,000	975,200	0,200
9	1010,000	1010,006	0,006	39	951,000	950,760	0,240
10	930,000	929,665	0,335	40	925,000	925,197	0,197
11	827,000	828,459	1,459	41	850,000	850,056	0,056
12	1115,000	1114,829	0,171	42	884,000	884,436	0,436
13	975,000	975,208	0,208	43	884,000	884,406	0,406
14	855,000	855,114	0,114	44	915,000	911,266	3,734
15	800,000	800,046	0,046	45	880,000	880,024	0,024
16	750,000	749,971	0,029	46	895,000	894,984	0,016
17	1080,000	1079,649	0,351	47	918,000	918,275	0,275
18	975,000	975,021	0,021	48	912,000	912,319	0,319
19	965,000	964,996	0,004	49	878,000	879,394	1,394
20	815,000	815,020	0,020	50	870,000	869,999	0,001
21	780,000	780,003	0,003	51	915,000	915,002	0,002
22	1070,000	1070,181	0,181	52	915,000	914,885	0,115
23	1010,000	1009,999	0,001	53	970,000	970,027	0,027
24	940,000	939,936	0,064	54	990,000	989,734	0,266
25	884,000	884,875	0,875	55	1270,000	1269,744	0,256
26	800,000	800,072	0,072	56	1530,000	1530,095	0,095
27	1170,000	1169,969	0,031	57	1305,000	1304,724	0,276
28	1070,000	1070,095	0,095	58	1345,000	1345,157	0,157
29	1153,000	1150,850	2,150	59	1285,000	1284,996	0,004
30	977,000	979,274	2,274				



Para todos os pontos, foi obtido um RMS médio de 0,739. Analisando individualmente o RMS, observa-se que poucos pontos tiveram uma variação muito grande entre os valores de cota finais e iniciais, sendo que estes valores excederam 1 metro em apenas 5 pontos, atingindo uma variação máxima de 3,734 metros (ponto 44). O gráfico da figura 6.2 apresenta alguns intervalos de variação dos valores de RMS e a quantidade de pontos contidos em cada um.

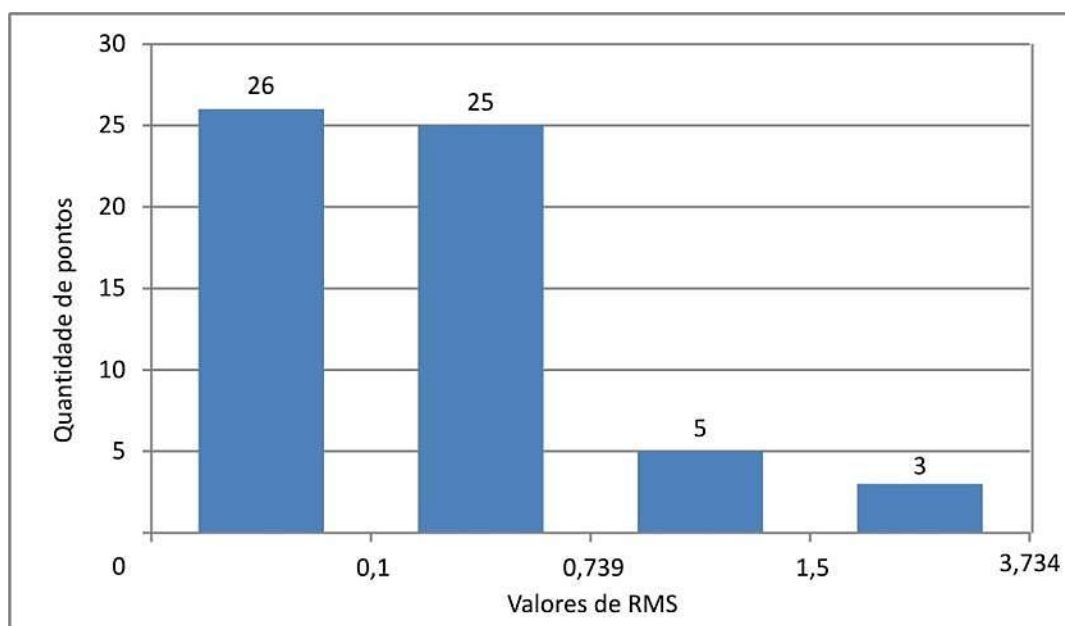


Figura 6.2 – Histograma apresentando a quantidade de pontos inseridos em alguns intervalos de valores de RMS.

Dos 59 pontos amostrados, 51 apresentam RMS individuais inferiores ao valor médio e, em 26 pontos, a variação é igual ou inferior a 0,1 metros. Apenas 8 pontos possuem valores de RMS superiores ao valor médio calculado, concluindo-se então que uma pequena quantidade de pontos apresenta valores de RMS elevados, aumentando consideravelmente o RMS médio.

A figura 6.3 apresenta o mapa da área com a distribuição dos pontos de verificação, destacando aqueles no qual o RMS excedeu o valor médio. É possível observar que a maioria dos pontos que apresentaram altos valores localiza-se dentro das minas, onde a topografia foi dada por pontos cotados. Outros locais que também apresentaram valores elevados situam-se na área administrativa, onde os dados topográficos disponíveis apresentam-se desta mesma forma, o que possivelmente gerou conflito com as curvas de nível existentes.

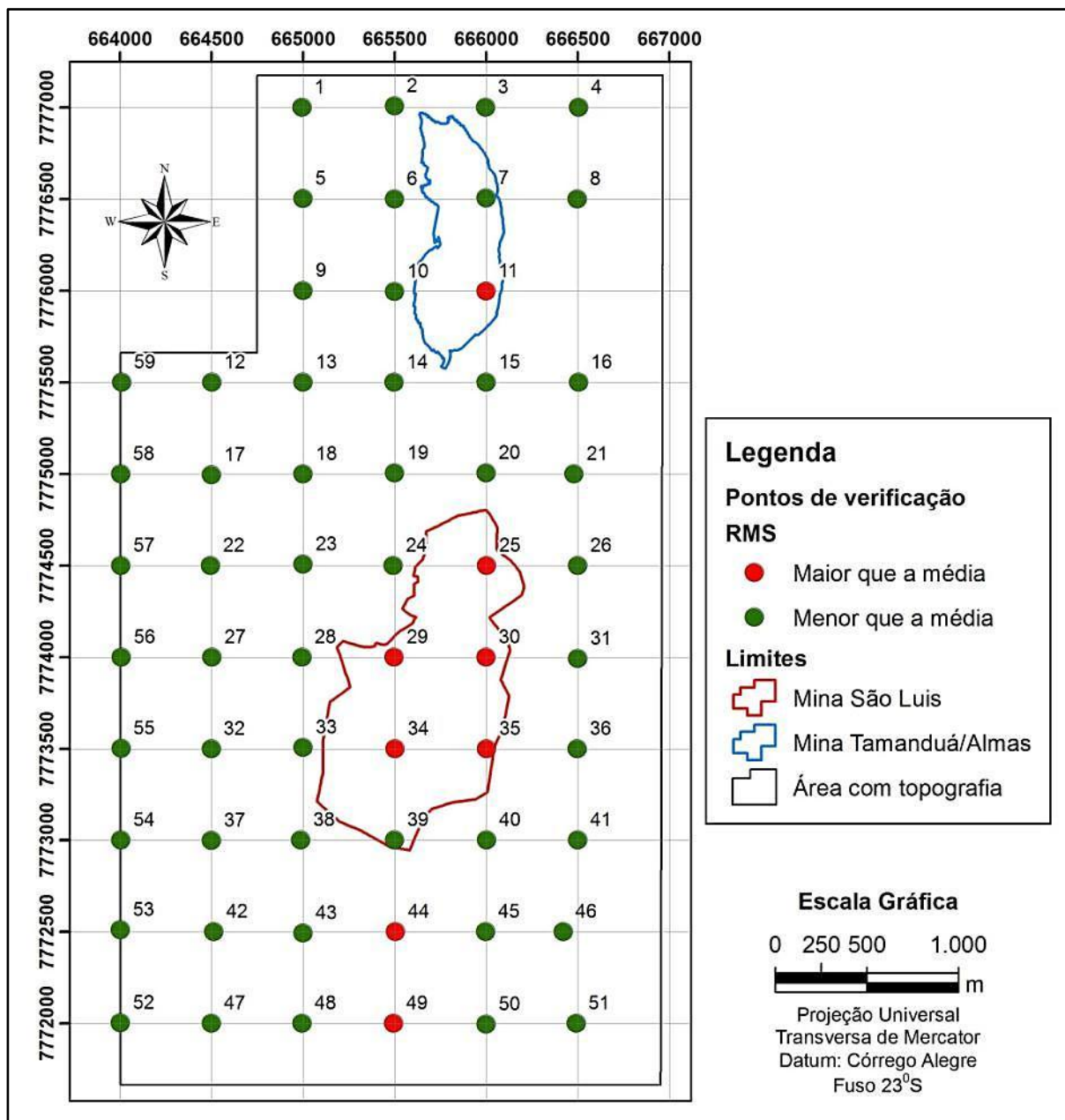


Figura 6.3 – Mapa da área de estudo apresentando os pontos utilizados para verificação da topografia, destacando aqueles com RMS maior que o valor médio.

Sendo assim, para a análise semi-regional a base topográfica gerada demonstra uma boa confiabilidade em relação às informações originais. Contudo, para uma análise de detalhe esta base pode não fornecer valores precisos em alguns pontos, principalmente dentro da mina e na área administrativa (região dos pontos 44 e 49). Particularmente dentro da mina, devido à própria dinâmica da atividade de mineração, a topografia é um dado que varia constantemente, sendo necessária a constante atualização destes dados, caso informações mais precisas se fizerem necessárias.

### 6.1.3 Mapas temáticos

A análise semi-regional, foi baseada na interpretação dos mapas temáticos de bacias hidrográficas, declividade, curvatura, direção de vertente e mapa geológico. Os resultados de cada um destes mapas estão apresentados e discutidos a seguir.

#### 6.1.3.1 Mapa de bacias Hidrográficas

Assim como a topografia, a drenagem não estava bem representada pela base fornecida. Desta forma, utilizou-se o pacote de funções do ArcGIS – *Spatial Analyst - Hydrology* para delimitar as drenagens e determinar as principais bacias hidrográficas da região. Ao todo foram identificadas 6 bacias hidrográficas, nomeadas a partir de sua posição relativa na área pesquisada. A figura 6.4 apresenta as bacias delineadas e a rede de drenagem elaborada para a área.

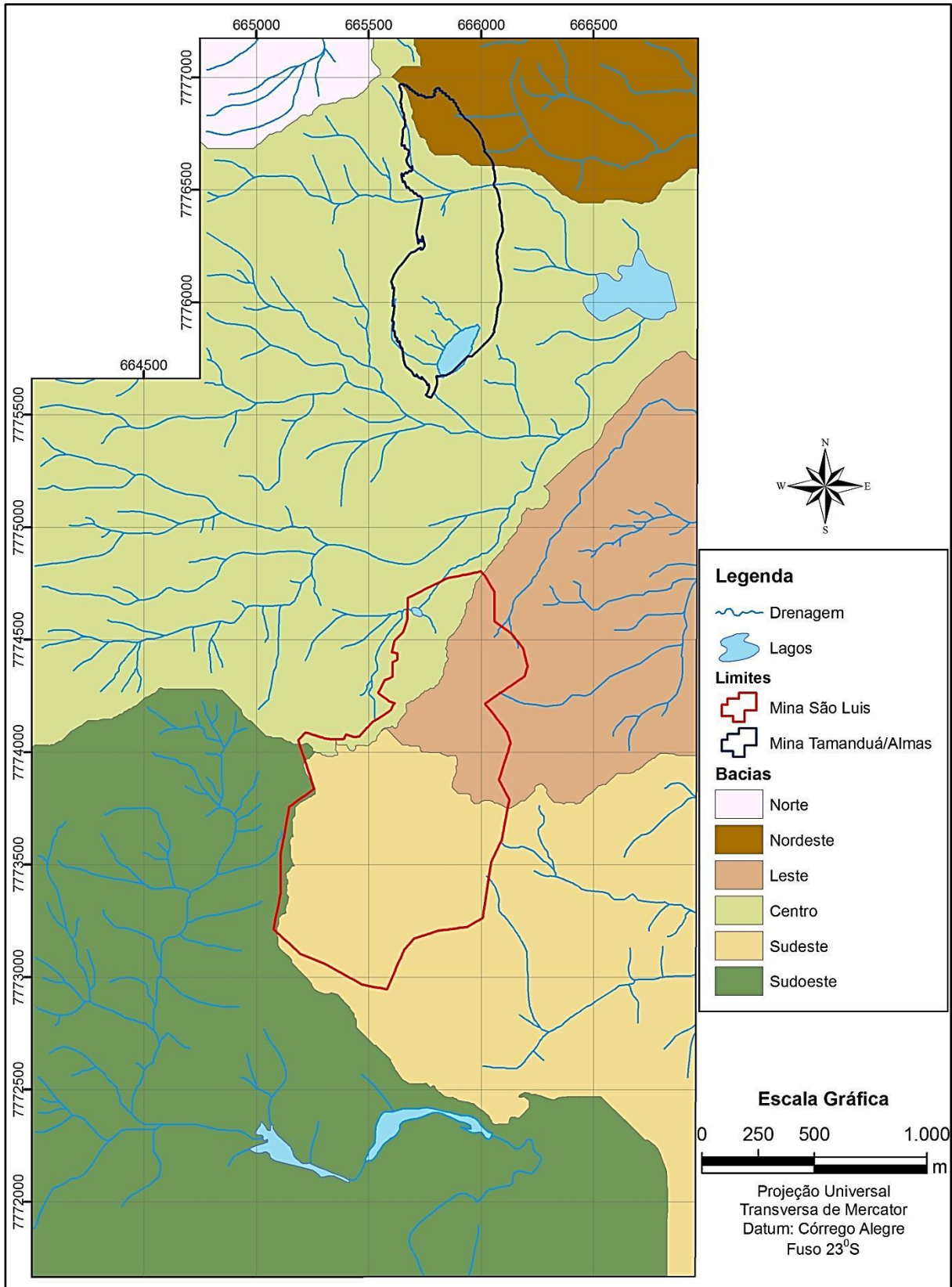


Figura 6.4 – Mapa da área de estudo apresentando as drenagens e bacias de captação delimitadas.

Observa-se que a própria área da mina São Luís serve como um divisor de águas local, estando seus limites próximo da divisão da bacia sudoeste, sudeste e centro. Além disto, está inserida em duas bacias que vertem para leste. A mina de Tamanduá/Almas tem a maioria de sua área inserida na bacia central, no quais águas vertem praticamente leste e são captadas por uma barragem. A extensão de cada bacia é apresentada na tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Área de abrangência das bacias da região da mina e entorno.

Nome	Área	
	(m <sup>2</sup> )	(%)
Nordeste	794405	5,2
Centro	5518826	36,4
Leste	1610129	10,6
Sudoeste	4359905	28,7
Sudeste	2590075	17,1
Norte	296419	2,0
<i>Total</i>	<i>15169759</i>	<i>100</i>

#### 6.1.3.2 Mapa de declividade

Foram definidas 3 faixas de intervalos contínuos de graus para a declividade, baseado no valor mínimo e máximo obtido para a região estudada. Considerou-se declividades baixas as contidas no intervalo de 0° a 17°, declividade moderada entre 17° e 30° e alta declividade entre 30° e 72°. O mapa de declividades está apresentado no apêndice B.

Pelo mapa, observa-se o predomínio do intervalo de declividade baixa, principalmente na porção sul, perfazendo 51,9% da área total. Valores de declividades altas concentram-se principalmente dentro das minas, caracterizando os taludes, e próximo a Serra do Caraça, que se localiza a oeste no mapa. A tabela 6.3 aponta a área ocupada por cada um dos intervalos estabelecidos, e individualizando-os também por bacias hidrográficas.

Tabela 6.3 – Área e porcentagem referentes às diferentes declividades apresentadas na região.

Declividade	Área por bacias (%)						Área total	
	Norte	Nordeste	Leste	Centro	Sudoeste	Sudeste	(m <sup>2</sup> )	%
0° - 17°	32,2	42,9	69,6	35,1	61,3	66,0	7877111	51,9
17° - 30°	49,3	40,9	22,4	42,8	21,8	24,7	4784240	31,5
30° - 72°	18,6	16,2	8,0	22,1	17,0	9,3	2508408	16,5

### 6.1.3.3 Mapa de curvatura

Este mapa apresenta três tipos de vertentes quanto à forma de sua curvatura, seja ela côncava, plana ou convexa, e está apresentado no apêndice C.

Foi analisada a distribuição espacial deste atributo para a área total investigada e individualmente por bacias hidrográficas. Segundo o mapa de curvatura, superfícies planas são predominantes na região, representando 48,3% da área total, já encostas côncavas e retilíneas apresentam valores próximos, perfazendo 25,4% e 26,3%, respectivamente. A tabela 6.4 a seguir resume os valores das áreas cobertas por cada tipo de vertente e suas porcentagens, incluindo os valores de porcentagens presente em cada bacia hidrográfica.

Tabela 6.4 – Área e porcentagem referentes aos tipos de curvatura presentes nos taludes e encostas da região.

Curvatura	Área por bacias (%)						Área total	
	Nordeste	Centro	Leste	Sudoeste	Sudeste	Norte	(m <sup>2</sup> )	%
Côncavo	28,7	28,8	22,9	21,1	25,7	28,2	3851926	25,4
Plano	39,6	39,2	56,0	58,2	49,8	38,7	7320875	48,3
Convexo	31,7	32,0	21,1	20,7	24,5	33,1	3996958	26,3

O mapa de curvatura não apresenta uma boa consistência na área das minas não sendo possível delimitar precisamente um padrão de taludes côncavos, planos e convexos. Deve-se a isto à atividade antrópica constante e dificultado pela escala da análise. Contudo, na área de entorno da mina, é possível identificar precisamente os perfis côncavos das encostas, que coincidem com o padrão de drenagem da área.

#### 6.1.3.4 Mapa de direção de vertente

A direção de vertente mostra o fluxo descendente em cada célula, indicando o sentido percorrido pelo fluxo d'água em cada região de acordo com as direções cardeais. Este mapa está apresentado no apêndice D.

Devido à presença da Serra da Canastra a oeste da área investigada, grande parte da drenagem verte para leste. Na área das minas a direção de fluxo apresenta-se um pouco mais difusa, devido a ser uma área com grande atividade humana. Contudo nesta região ainda é predominante o fluxo na direção leste e sudeste.

Analisando a tabela 6.5, verifica-se que em aproximadamente 57% da região possui vertentes nas direções leste, nordeste e sudeste, enquanto que cerca de 19% vertem para os lados opostos: oeste, noroeste e sudoeste. As direções norte e sul são responsáveis por 22,5% da área de drenagem, com cada uma destas direções correspondendo a aproximados 11% da área total.

Tabela 6.5 – Área coberta e porcentagem com direções de vertente na região de estudo.

Direção de Vertente	Área por bacias (%)						Área total	
	Nordeste	Centro	Leste	Sudoeste	Sudeste	Norte	(m <sup>2</sup> )	%
Norte	8,5	12,3	14,8	7,8	13,3	11,5	1703288	11,2
Nordeste	21,5	22,0	37,2	8,1	11,8	28,1	2725824	18,0
Leste	27,3	24,1	25,2	15,8	21,8	34,2	3307992	21,8
Sudeste	14,6	17,6	9,5	20,3	22,1	4,4	2713590	17,9
Sul	11,6	11,8	4,4	13,4	12,3	0,0	1716217	11,3
Sudoeste	7,9	4,2	1,6	11,1	7,3	0,1	991802	6,5
Oeste	3,9	2,4	2,2	13,7	4,8	3,6	934559	6,2
Noroeste	4,7	5,7	5,1	9,7	6,6	18,0	1076487	7,1

#### 6.1.3.5 Mapa litológico

O mapa geológico foi compilado a partir do mapa litoquímico fornecido pela VALE S/A e as investigações de campo realizadas. Este mapa está apresentado no apêndice E.

A formação Cauê é a litologia predominante na área das minas, sendo o corpo de minério explorado. As rochas encaixantes deste litotipo variam ao longo do corpo do minério, sendo que na mina São Luís as encaixantes predominantes são

os xistos do grupo Quebra-ossos a oeste e os filitos e quartzitos do grupo Piracicaba a leste. Na mina de Tamanduá/Almas as encaixantes do corpo de minério pertencem ao grupo Caraça, composto por filitos e quartzitos.

A área de estudo é delimitada a leste por gnaisses e a oeste pelos quartzitos do Grupo Caraça, que formam a Serra do Caraça.

Ao longo da área há a presença de coberturas de canga e de depósitos antrópicos, constituindo materiais rolados ou pilhas de estéril.

## 6.2 ANÁLISE DE DETALHE

### 6.2.1 Levantamentos de campo

A primeira investigação de campo precedeu a elaboração deste estudo, sendo fruto de um trabalho desenvolvido pela empresa VOGBR para a VALE S/A. Este mapeamento abrangeu todas as minas do Complexo Fazendão, e focou na classificação dos parâmetros de resistência e grau de alteração do maciço, além do levantamento de dados estruturais e suas características. Ao total foram cadastrados 470 pontos ao longo das 3 minas, apresentado na figura 6.5.



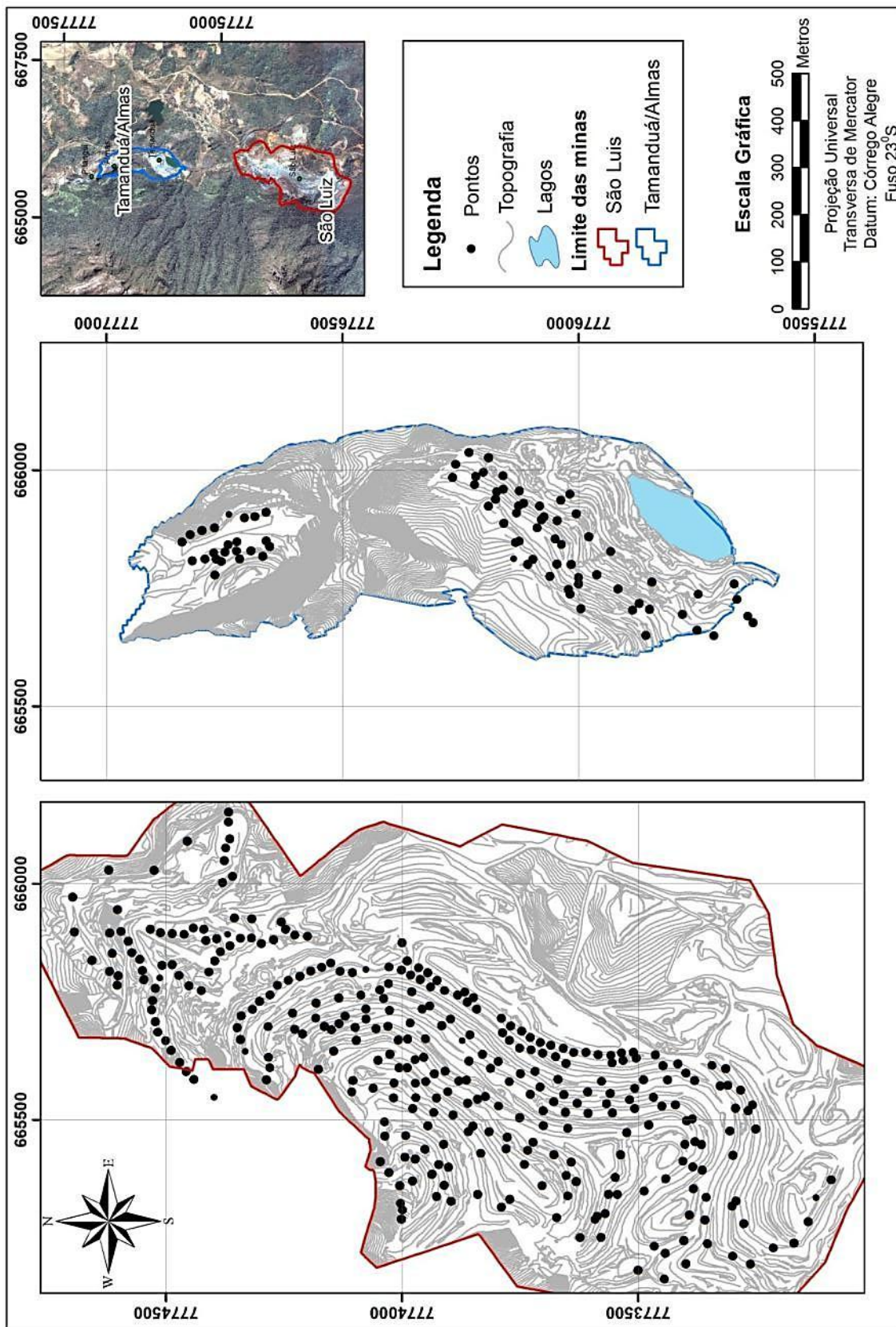


Figura 6.5 – Mapa de pontos das minas São Luís e Tamanduá/Almas.

Ao acessar a mina São Luís observam-se erosões que afetavam várias bancadas (figura 6.6). Além destas erosões de grande porte, também estão presentes erosões de menor tamanho, afetando 1 ou 2 bancadas. A figura 6.7 mostra em detalhe uma destas erosões, onde a bancada superior foi totalmente comprometida.



Figura 6.6 – Erosões na mina de São Luís afetando vários taludes.



Figura 6.7 – Detalhe de uma erosão, que destruiu totalmente o acesso da bancada superior.

Estas feições podem combinar com outros processos de instabilidade oferecendo risco à segurança. Entretanto, as erosões muitas vezes atuam como agente efetivo preparatório à ocorrência de escorregamentos.

Em campo, um dos objetivos foi a padronização da classificação dos parâmetros de resistência. Este trabalho adotou a classificação proposta por Vaz (1996), a partir de uma relação entre os critérios estabelecidos por este autor e a realizada na primeira etapa de campo. Esta correlação apresentou-se bastante coerente, sendo balizada principalmente pelas características de identificação de campo (ISRM, 1981) e o método de escavação (VAZ, 1996).

Utilizando estas informações de campo convertidas para esta nova classificação, foi gerado um mapa de resistência/grau de alteração para a mina de São Luís, apresentado na figura 6.8. A partir deste mapa observa-se que praticamente toda a mina é composta por RAM, contendo núcleos de RS e alguns de RAD. Nos pontos cadastrados não foram identificados SE ou SA.

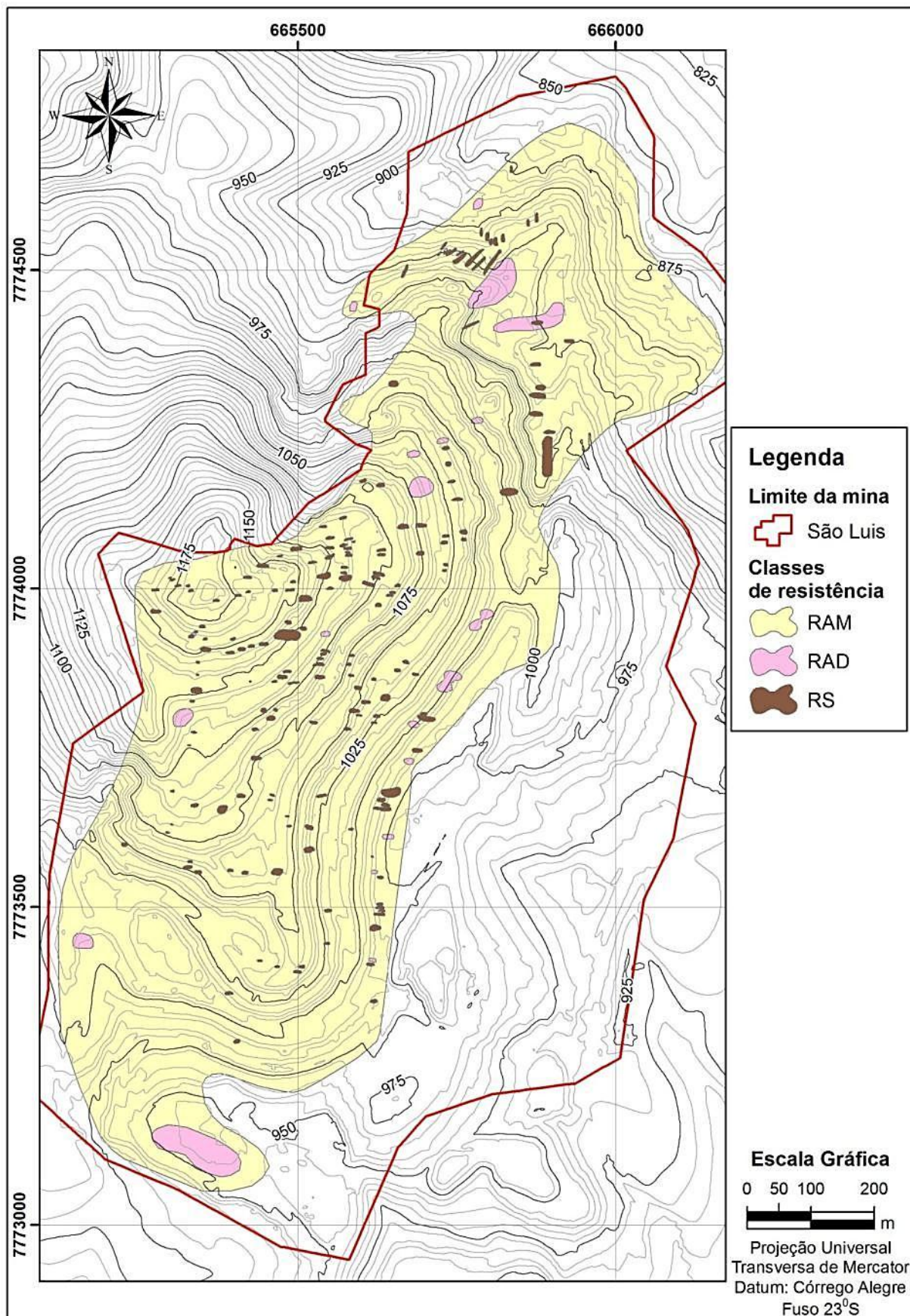


Figura 6.8 – Mapa de classes de maciço da mina de São Luís.

- Rocha Alterada Mole – RAM

Em campo, a RAM está representada por um itabirito friável, podendo ser quebrado facilmente utilizando o martelo geológico ou até mesmo as mãos. Em alguns pontos, este material se desfragmenta ao longo do talude e vai se acumulando em sua base, fazendo com que a inclinação na base do talude seja mais suave que a sua inclinação no topo, como mostra a figura 6.9.



Figura 6.9 – Itabirito friável (RAM) com acumulação de material na base do talude.

Apesar da RAM ser um material favorável a extração, para priorizar a segurança e estabilidade dos taludes neste tipo de material é necessário à utilização de ângulos de talude relativamente mais suaves, devido a sua baixa resistência e coesão. Além disto, este material é mais sujeito a ação de erosão e infiltração, sendo necessária maior atenção quanto a sua estabilidade.

- Rocha Alterada Dura - RAD

As RAD estão localizadas em alguns pontos do mapa sem apresentar uma distribuição preferencial. São compostos por itabiritos apresentando uma resistência

considerável, mas com grau de alteração moderado. Esta classe apresenta-se geralmente na cor ocre, indicando a alteração de hematita para goethita. A figura 6.10 ilustra o aspecto usual da RAD na área da mina.



Figura 6.10 – Itabirito ocre característico de RAD na mina São Luís.

Contudo é necessário ressaltar que a cor apenas não é suficiente para caracterizar a RAD. Primeiramente, devido a variação entre os tons de ocre, podendo se apresentar num tom claro até um marrom-avermelhado. Em alguns pontos, o itabirito friável também apresenta esta coloração típica, sendo necessário verificar a resistência do material.

- Rocha Sã - RS

As RS estão localizadas ao longo de toda a mina, com uma distribuição aleatória. São representados por itabiritos compactos, geralmente formando núcleos métricos de forma alongada, abrangendo um ou mais taludes como pode ser observado na figura 6.11. Apresentam resistência muito alta, e seus minerais constituintes encontram-se sãos ou praticamente sãos.



Figura 6.11 – Talude apresentando núcleos de itabirito compacto (RS).

As dimensões destes núcleos de RS variam bastante, às vezes perfazendo toda a altura do talude. Devido a sua alta resistência, este material representa um problema no momento de sua extração, sendo necessário o emprego de explosivos ou equipamentos pesados para quebrar os blocos em partes menores.

Taludes compostos de um material com alta resistência representa um ganho em segurança, permitindo que sejam realizados com maior inclinação. Este é o caso quando o núcleo abrange toda extensão do talude. Entretanto, blocos de menores dimensões representam um risco, pois além de exercer um peso extra sobre o talude, os próprios blocos podem se instabilizar e vir a rolar, podendo causar acidentes.

### **6.2.2 Levantamento de seções transversais à cava**

Foram demarcadas 3 seções em diferentes partes da mina, posicionadas perpendicularmente a direção dos taludes. A seção 1 está localizada a norte da mina

São Luís, a seção 2 localiza-se a oeste, e a seção 3 esta situada no centro, conforme o mapa apresentados no apêndice F.

Em campo foram cadastrados 24 pontos ao longo das seções, verificando a geometria do perfil, a classe dos maciços As atitudes dos taludes das seções 1, 2 e 3 foram lançadas em estereogramas, obtendo as seguintes direções e mergulhos médios: seção 1 - N25°W; 57°NE; seção 2 - N80°W; 61°SW; e seção 3 - N29°E; 56°SE (figura 6.12 – A, B e C respectivamente).

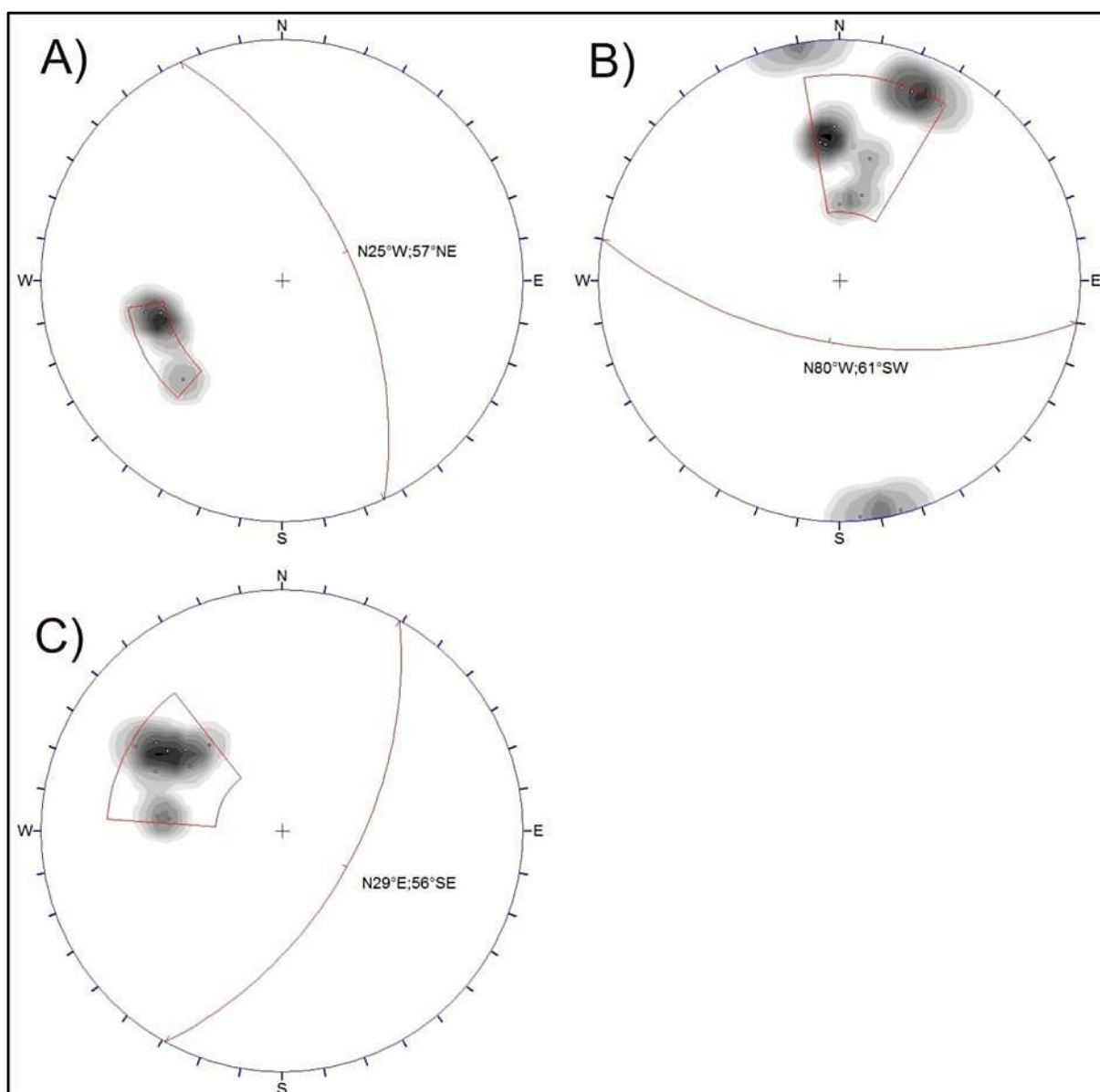


Figura 6.12 – Concentração de polos apresentando a direção preferencial dos taludes nas seções: A) Seção 1; B) Seção 2 e C) Seção 3.



Os estereogramas indicam uma diferença tanto na direção quanto nos mergulhos dos taludes ao longo das seções. A seção 2, por exemplo, chega a apresentar alguns taludes com mergulho subverticais.

As figuras 6.13, 6.14 e 6.15 apresentam os perfis elaborados a partir dos dados de campo para a seção 1, 2 e 3 respectivamente. Observa-se que os comprimentos das bancadas e dos taludes variam ao longo dos perfis, não obedecendo a uma padronização.

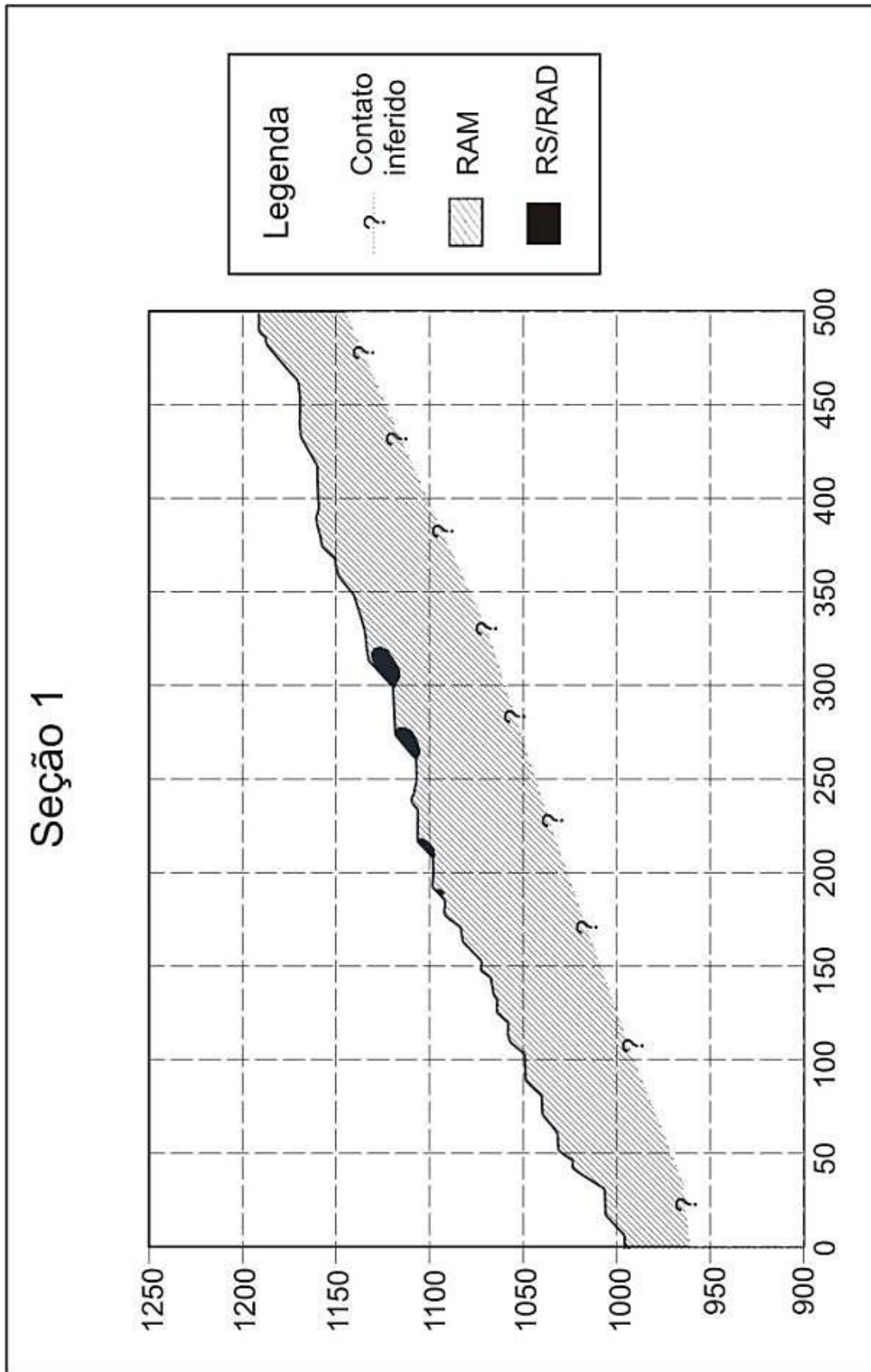


Figura 6.13 – Perfil de alteração para a seção 1

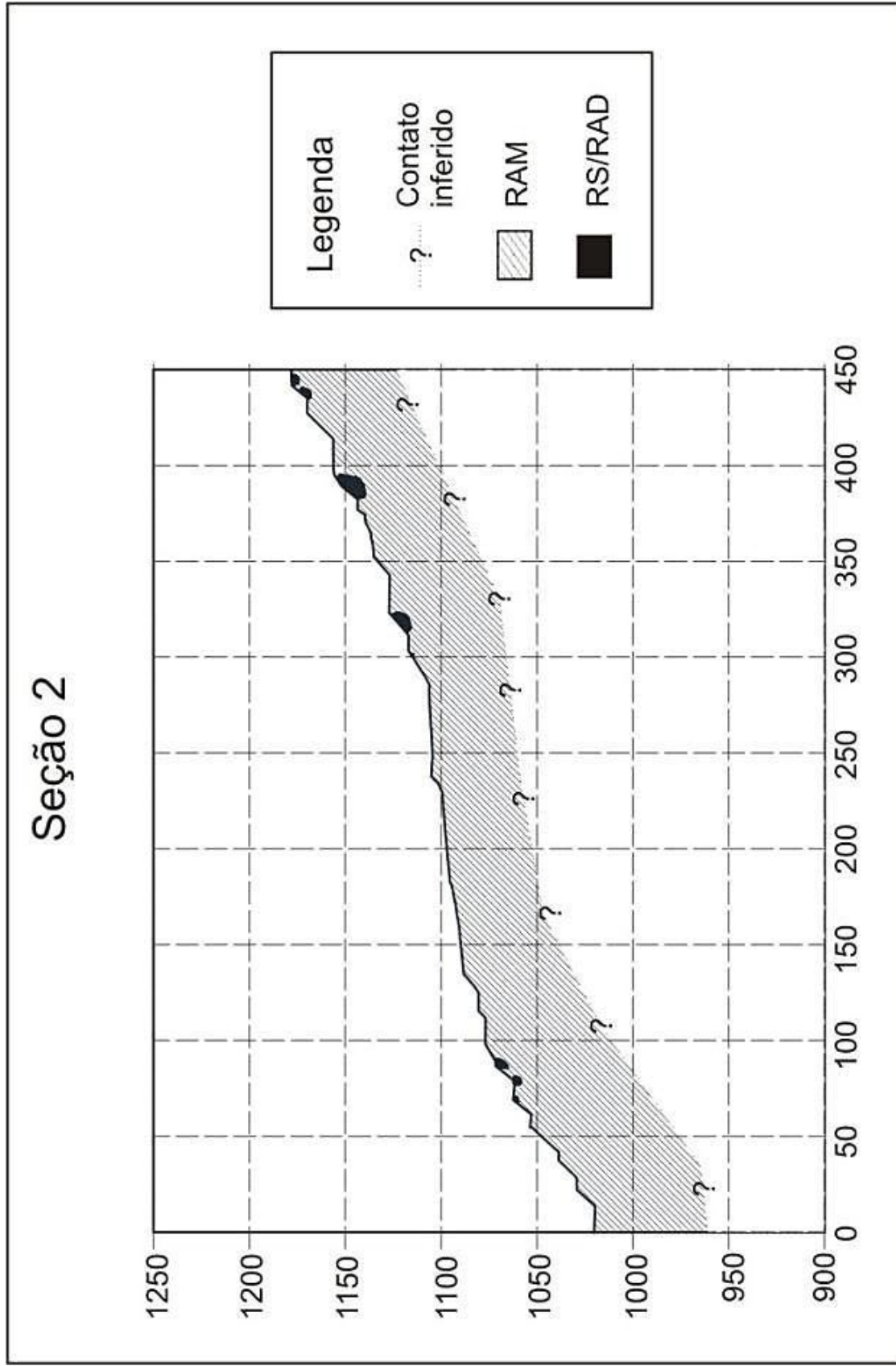
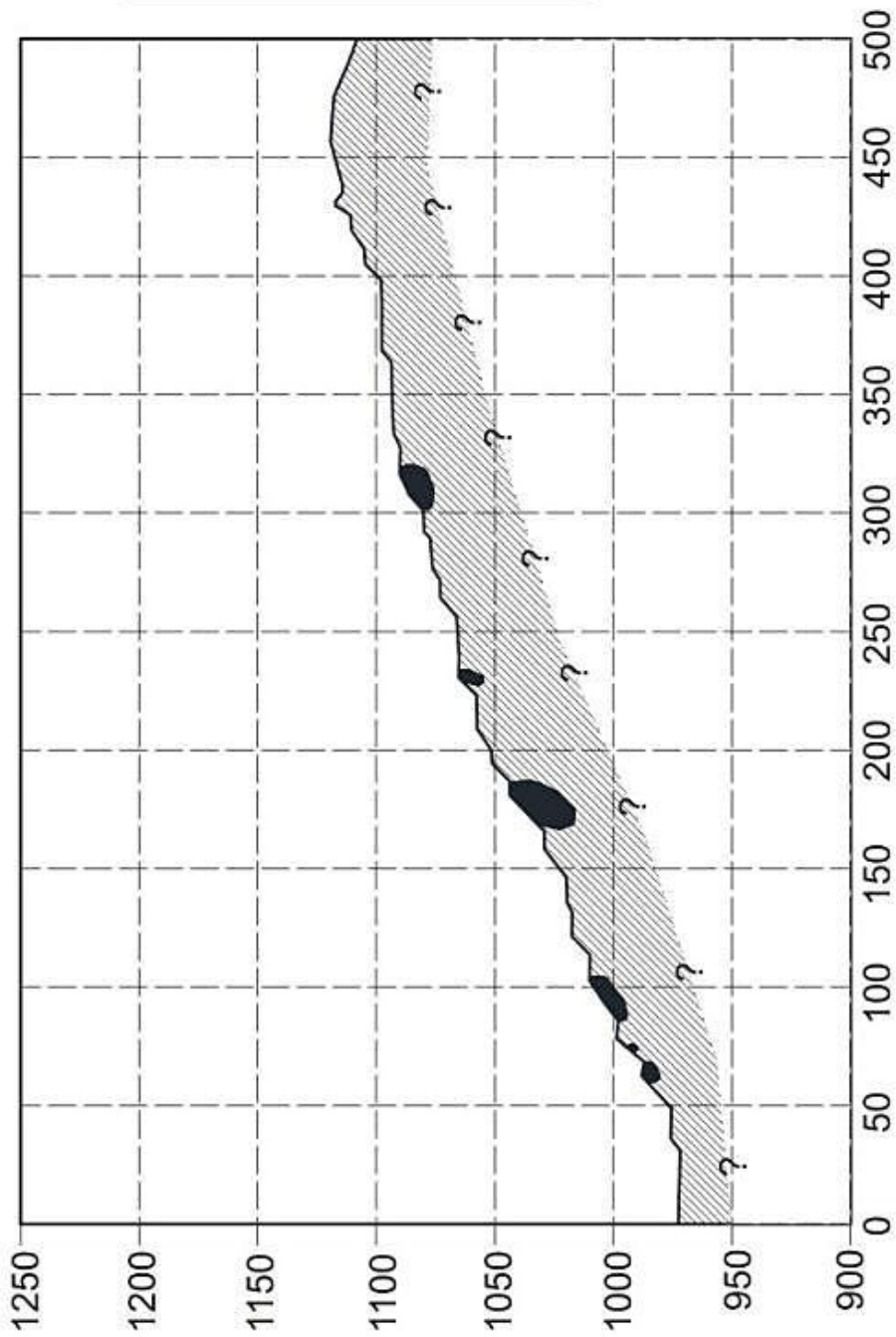


Figura 6.14 – Perfil de alteração obtido para a seção 2.

# Seção 3



**Legenda**

- .....? Contato inferido
- [Hatched Box] RAM
- [Solid Black Box] RS/RAD

Figura 6.15 – Perfil de alteração obtido para a seção 3.

O perfil de alteração predominante nos 3 perfis são rochas alteradas moles, apresentando blocos de RS ou RAD posicionados de forma aleatória. Dados de sondagem fornecidos pela VALE S/A indicam que estes blocos também ocorrem em profundidade, desta forma é possível encontrar material mais resistente em meio a rocha alterada mole no subsolo.

### 6.2.3 Análise estrutural

Devido aos grandes eventos tectônicos que afetaram esta região, as rochas que afloram na mina apresentam um elevado grau de deformação. Estas deformações estão representadas na forma de estruturas tais como fraturas, xistosidades, bandamento, lineação mineral, eixo de dobras e falhas. Em alguns pontos a rocha encontra-se bastante deformada, gerando estruturas em lápis, como pode ser visto na figura 6.16.



Figura 6.16 – Formação de estruturas em lápis devido ao alto grau de deformação.

A presença destas discontinuidades tem grande influência na estabilidade dos taludes desta mina, já que estes constituem planos de fraqueza dentro do maciço rochoso. Devido a sua importância, durante o mapeamento foram levantados 886 dados estruturais e também 440 direção/mergulho de taludes, que foram utilizados na geração de estereogramas e análises de estabilidade.

O bandamento ao longo de toda mina é a feição mais marcante. Ela é facilmente identificada em todos os taludes, desde que não haja material encobrindo totalmente o mesmo. A figura 6.17 apresenta as linhas que marcam a intersecção do bandamento com a face do talude, quando o talude tem direção aproximadamente perpendicular ao bandamento.

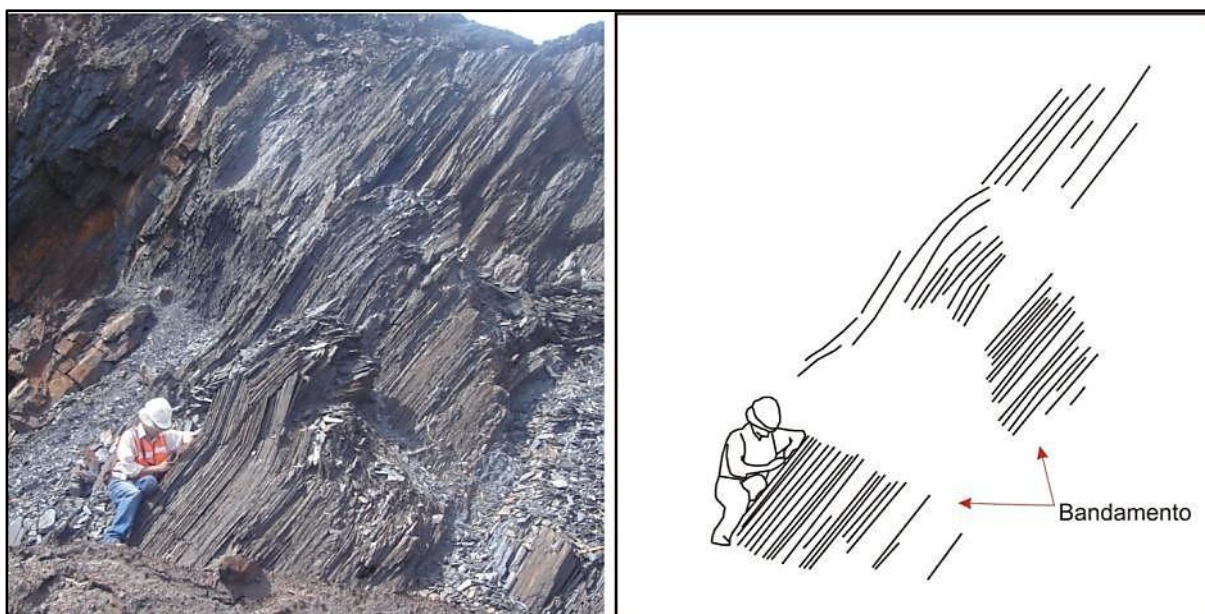


Figura 6.17 – Linhas demonstrando a intersecção do bandamento com o talude.

O bandamento geralmente representa uma discontinuidade fechada na rocha sã. Contudo processos de alteração podem fazer com que esta estrutura encontre-se aberta, apresentando níveis quartzosos oxidados. Na mina São Luís, o bandamento apresenta uma direção média de N17°E; 53°SE (figura 6.18). Na mina de Tamanduá/Almas, a direção é semelhante, apresentando atitude N02°W; 46°NE (figura 6.19).

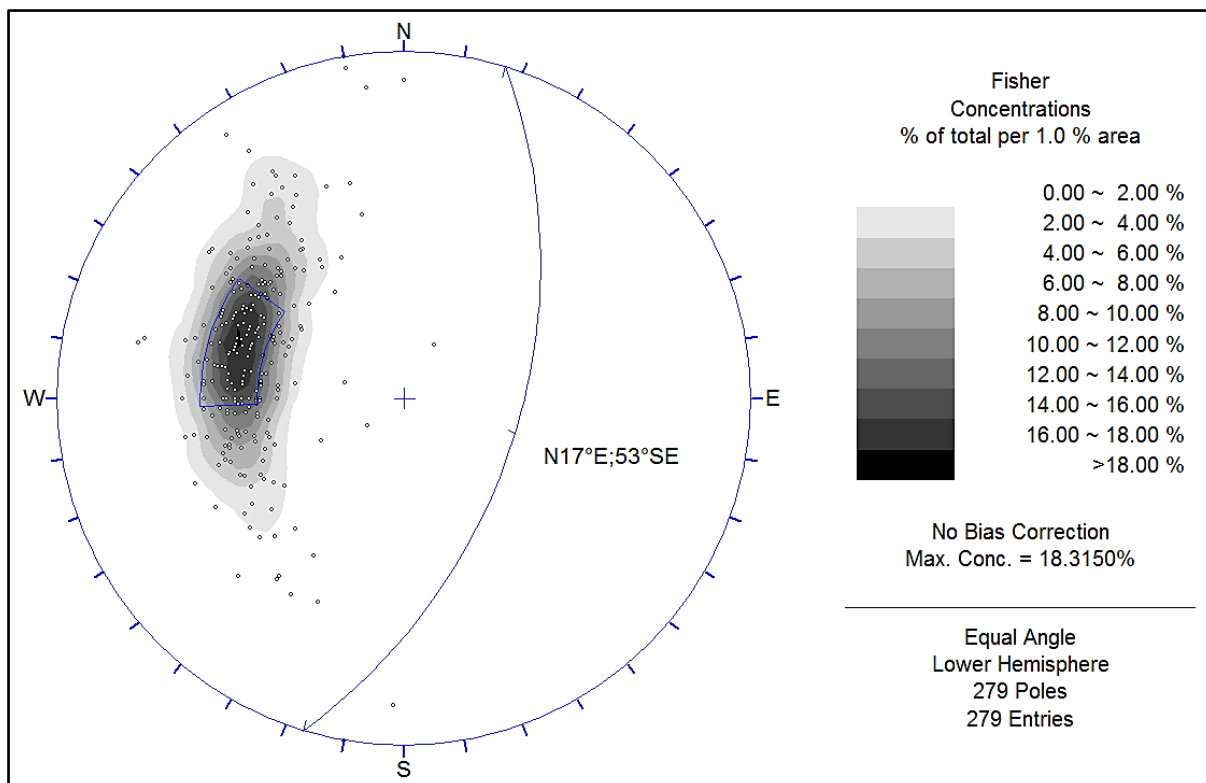


Figura 6.18 – Direção geral do bandamento ( $S_b$ ) dos itabiritos dentro da mina São Luís.

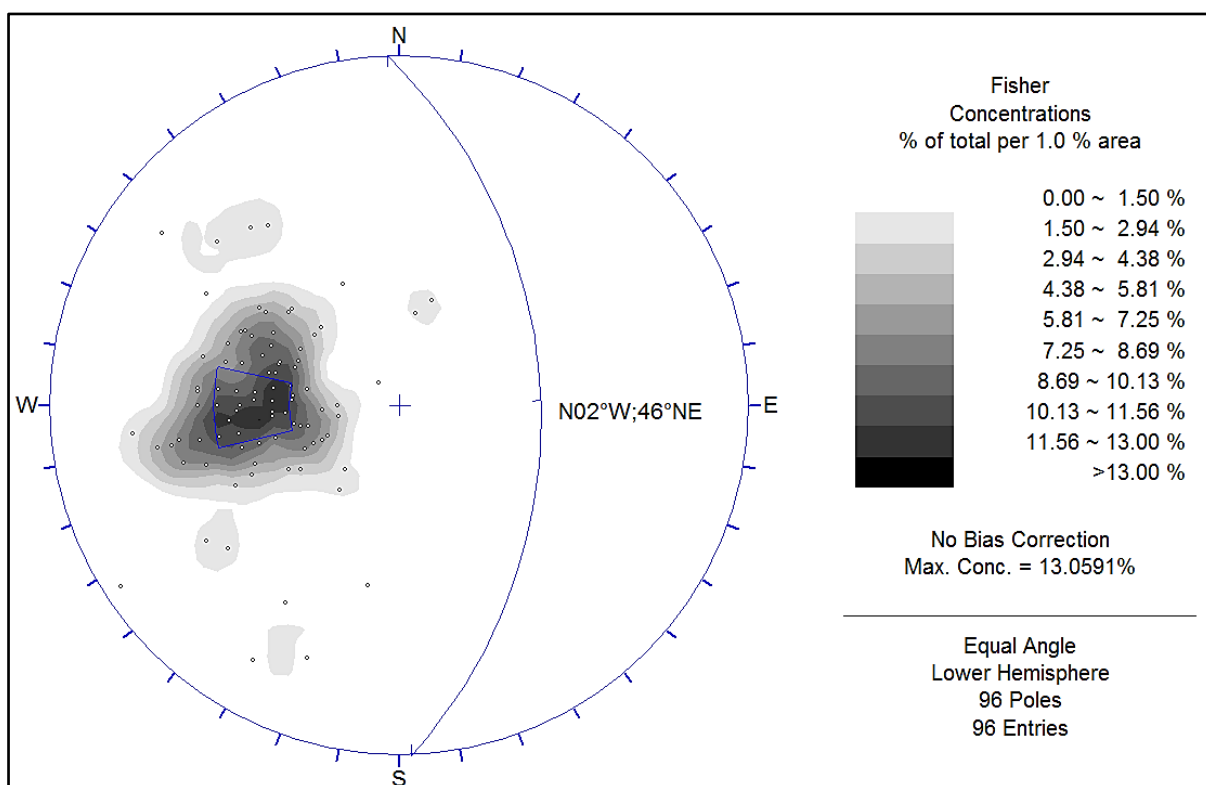


Figura 6.19 – Direção geral do bandamento ( $S_b$ ) dos itabiritos dentro das minas tamanduá/Almas.

Nas rochas adjacentes foram obtidas medidas de foliação/xistosidade que indicam um paralelismo com o bandamento ( $S_r/S_b$ ), apresentando direção geral

N09°E;51°SE (figura 6.20), indicando um evento de deformação que envolveu todos os litotipos da região.

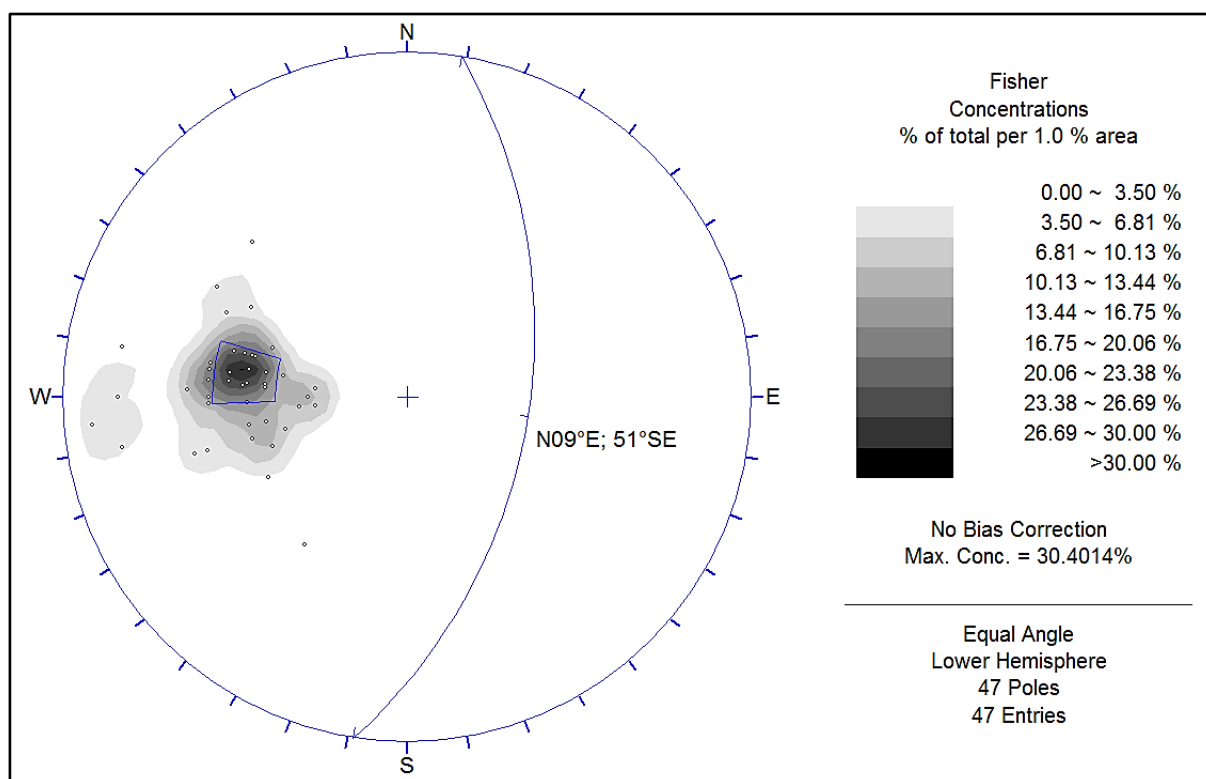


Figura 6.20 – Direção da foliação/xistosidade ( $S_n$ ) nas rochas adjacentes ao itabirito.

Os taludes dentro da mina São Luís possuem direções diversas, contudo a direção preferencial geral é N17°E; 54°SE e secundária N66°W; 55°SW, com menor concentração de polos, como pode ser observado no estereograma da figura 6.21.



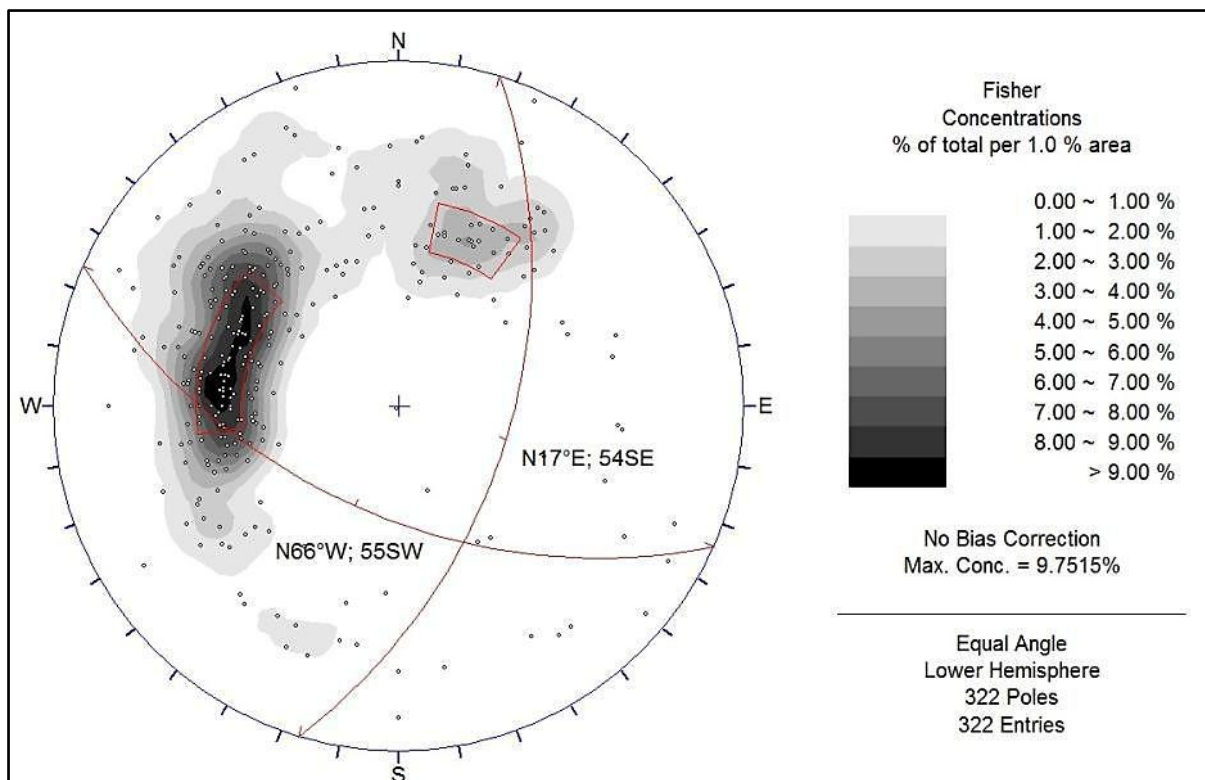


Figura 6.21 – Direções de taludes na mina São Luís, com direção principal ( $T_1$ ) N17°E; 54°SE e direção secundária ( $T_2$ ) N66°W; 55°SW.

Analisando os taludes em geral, observa-se que a inclinação praticada na mina fica entre 50° e 70°, totalizando aproximadamente 63% do total dos taludes, como pode ser observado pelo gráfico da figura 6.22.

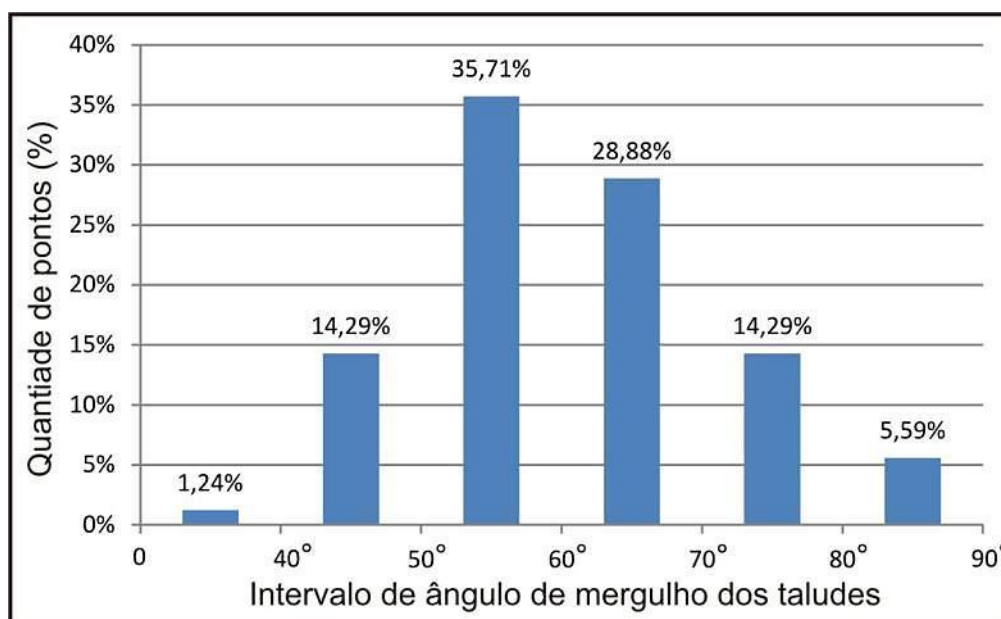


Figura 6.22 – Gráfico apresentando a concentração de pontos por faixas de inclinação de inclinação na mina de São Luís.

Através dos dados estruturais coletados, foram identificados 3 principais famílias de fraturas, apresentados no estereograma da figura 6.23. A família mais marcante ( $F_1$ ) apresenta direção geral N85°W; 88°NE, com mergulho de alto ângulo variando entre norte e sul. A segunda família de fraturas ( $F_2$ ) apresenta direção geral N18°E; 42°NE e a terceira ( $F_3$ ) N57°W; 66°NE.

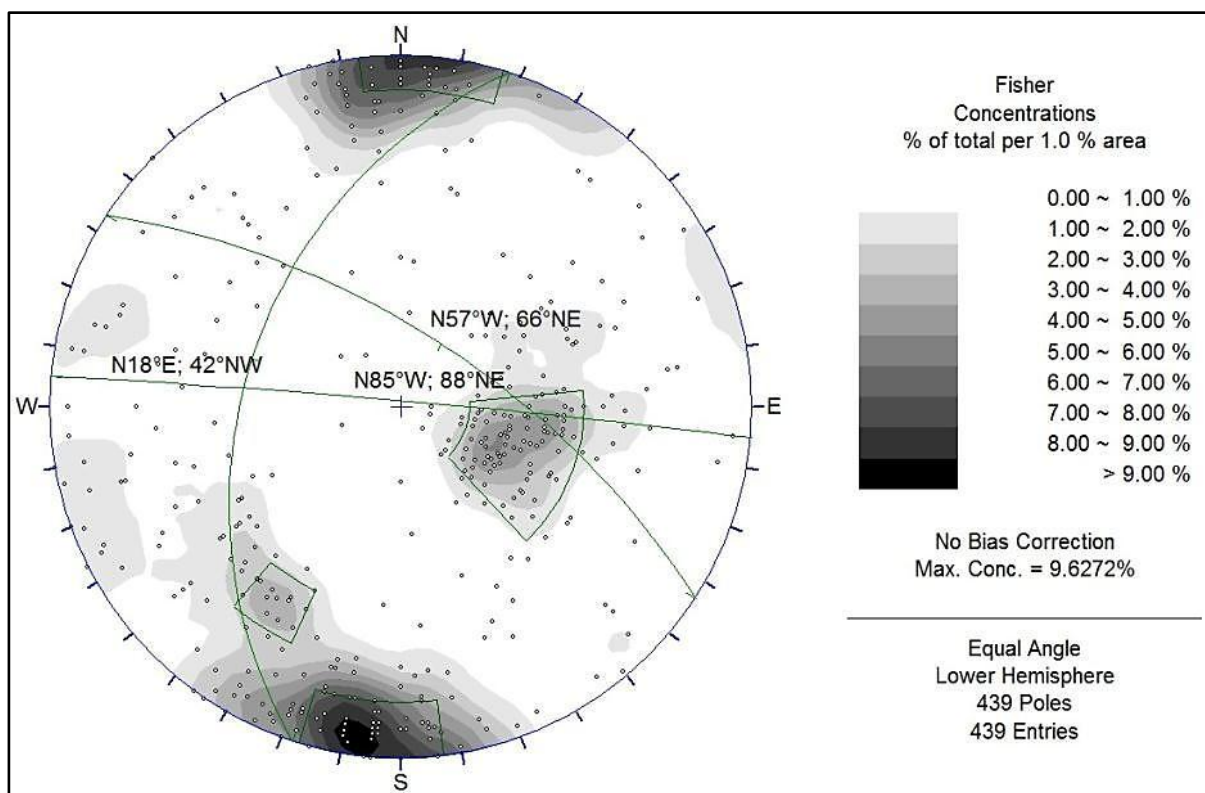


Figura 6.23 – Estereograma contendo dados das fraturas coletadas durante o mapeamento, indicando o plano geral das 3 principais famílias de descontinuidades.

Com base nas propriedades das descontinuidades obtidas em campo, a família de descontinuidades  $F_1$  encontra-se geralmente selada com superfície ondulada rugosa. Predomina espaçamento inferior a 6 cm, chegando até 20 cm, com persistência entre 3 a 10 metros.

A família de juntas  $F_2$  apresenta superfície ondulada rugosa com abertura inferior a 0,5 mm. Seu espaçamento está entre 6 e 20 cm e persistência de 1 a 3 metros.

As descontinuidades da família  $F_3$  estão seladas, com parede ondulada rugosa, não apresentando preenchimento. Os espaçamentos destas descontinuidades estão entre 6 e 20 cm e persistência inferior a 1 metro.

## 6.2.4 Análises de estabilidade com projeção estereográfica

### 6.2.4.1 Rupturas planares

Pelos estereogramas de direção de taludes e de fraturas, apresentados nas figuras 6.21 e 6.23 respectivamente, observa-se que, na mina São Luís as direções das fraturas não representam um risco a este tipo de ruptura, por não satisfazer a condição de paralelismo às direções gerais dos taludes conforme o critério proposto por Hoek e Bray (1981).

Entretanto, a direção do bandamento (figura 6.18) satisfaz esta condição em relação à direção do talude  $T_1$  e possui ângulo menor que o do mesmo. Desta forma este tipo de ruptura é passível de acontecer, já que os critérios são atendidos como pode ser observado no estereograma da figura 6.24. Além disto, o plano de fratura  $F_1$  pode atuar como planos de liberdade para este tipo de deslizamento.

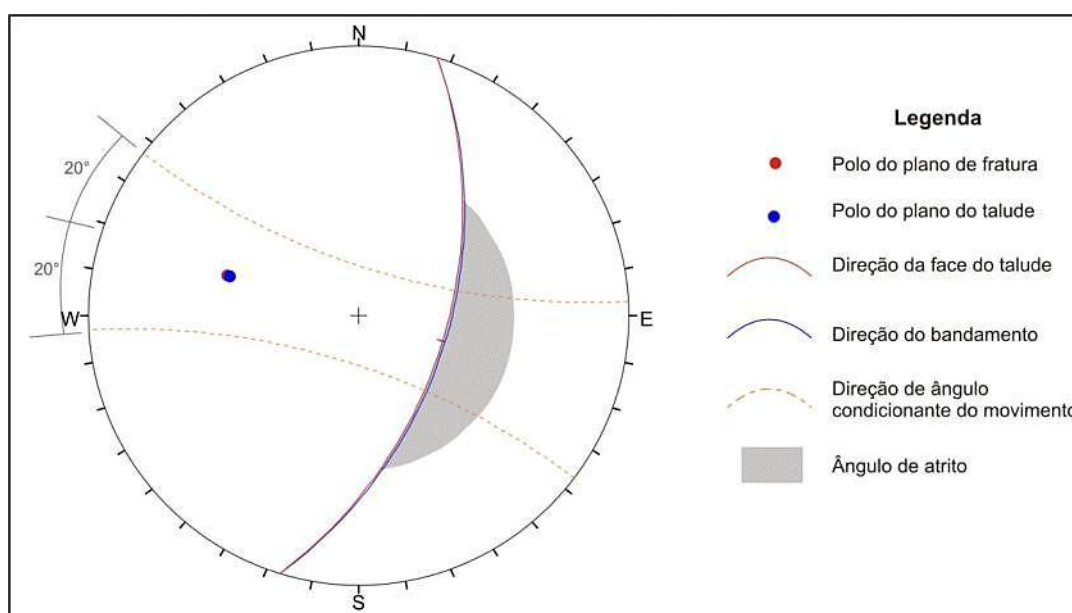


Figura 6.24 – Análise de ruptura planar para o talude  $T_1$ .

Entretanto, em campo não foram identificadas deslizamentos desta natureza. O que se observa é um deslocamento centimétrico em alguns taludes, como pode ser visualizado na figura 6.25. Isto ocorre provavelmente devido as bandas serem milimétricas a centimétricas e ao espaçamento entre as fraturas da família  $F_1$  ser relativamente pequeno.



Figura 6.25 – Deslocamento devido ao bandamento do itabirito na mina São Luís.

#### 6.2.4.2 Rupturas em cunha

Para que ocorra o movimento em cunha não é obrigatório que o plano de deslizamento esteja subparalelo ao talude, diferentemente do movimento planar. Além disto, o confinamento lateral é imposto apenas pelas fraturas que geram o movimento.

Como mostra o estereograma da figura 6.26, para o talude  $T_2$  de direção  $N66^\circ W$ ;  $55^\circ SW$  não ocorre o risco de ruptura deste tipo, já que as intersecções dos planos estão em direções opostas à direção deste talude.

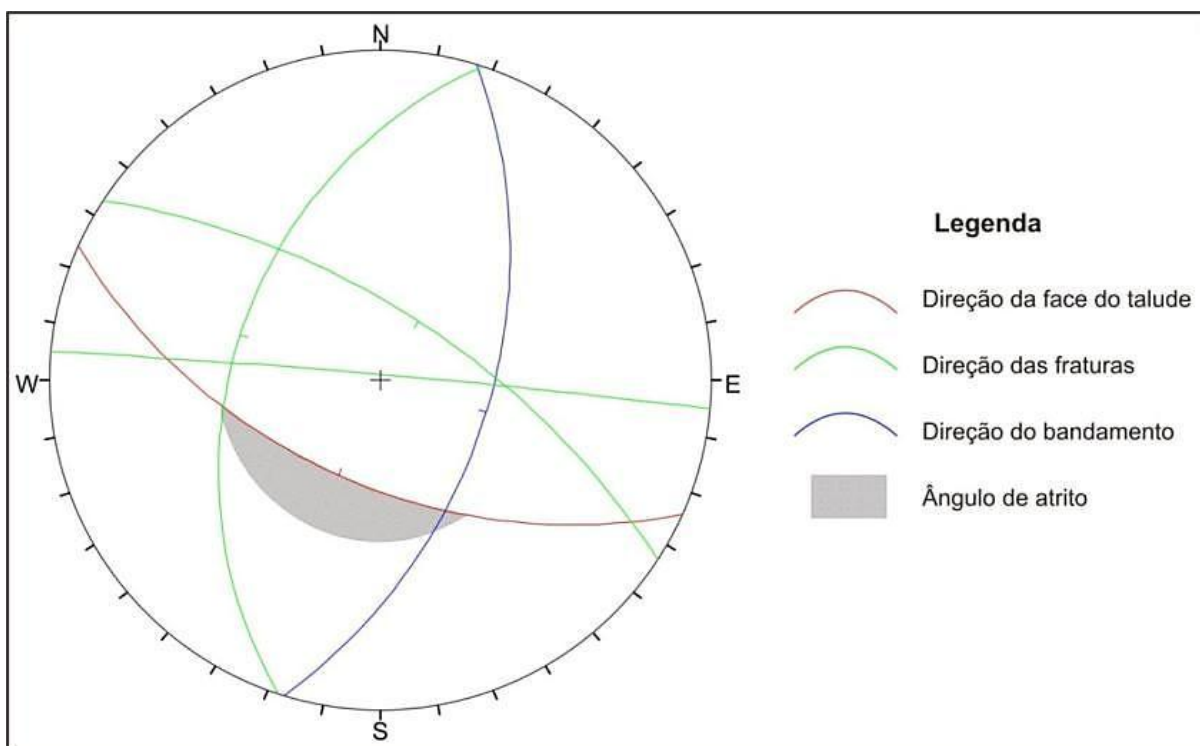


Figura 6.26 – Análise de ruptura em cunha para o talude de direção N66°W; 55°SW.

Entretanto, analisando o estereograma da figura 6.27, o talude  $T_1$  de direção N17°E; 54°SE, que é o mais frequente na cava, apresenta intersecção de três planos capazes de gerar o deslizamento deste tipo.

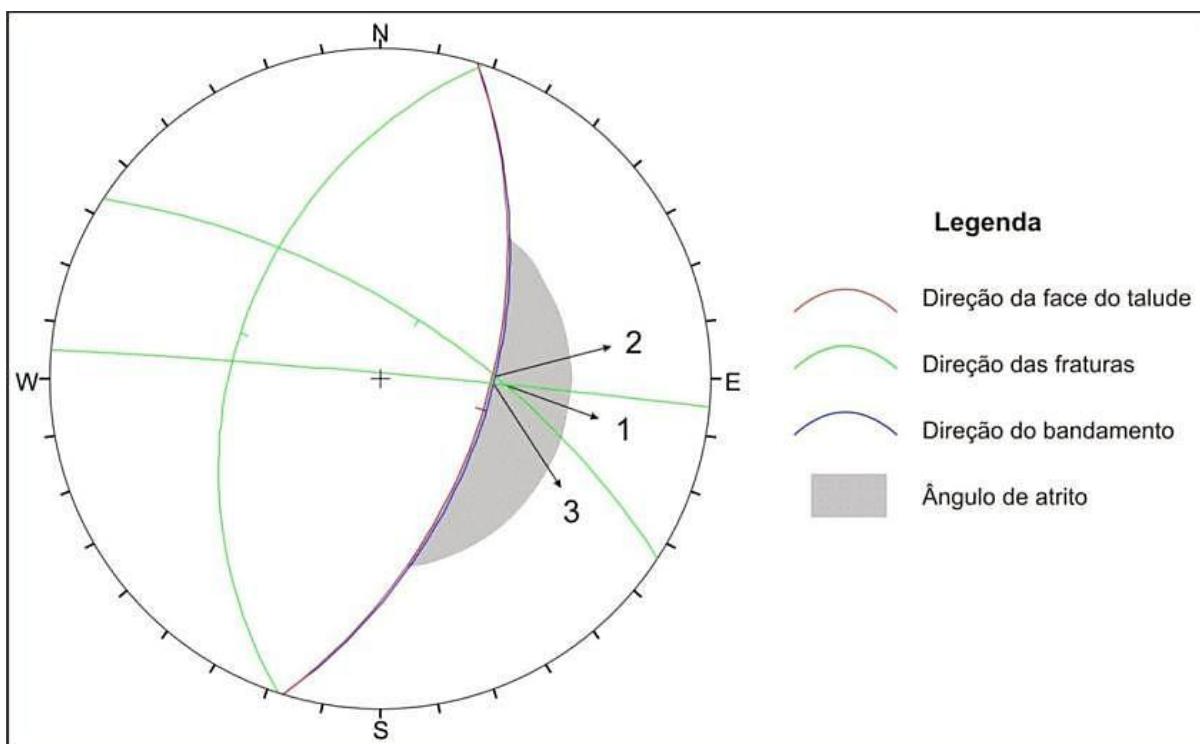


Figura 6.27 – Análise de ruptura em cunha para o talude de direção N17°E; 54°SE.

A linha de intersecção 1 possui direção S01°E; 49° e é gerada pelo plano de fratura N85°W; 88°NE com o N57°W; 66°NE. As outras direções de ruptura são geradas pela intersecção destes planos com o bandamento e possuem direção N90°E; 52° (2) e S01°E; 52° (3).

As linhas de intersecções possuem direção e mergulho subparalelos ao talude. Isto faz com que a ruptura também possua um alto valor de mergulho, o que aumenta a chance da ruptura se dar de forma abrupta. A figura 6.28 apresenta uma ruptura deste tipo.



Figura 6.28 – Talude apresentando ruptura em cunha formado pela intersecção do bandamento ( $S_b$ ) com o plano de fratura  $F_3$ .

#### 6.2.4.3 Rupturas por tombamento

Analisando as famílias de descontinuidades principais e a direção geral do bandamento, não há o risco de tombamento para o talude de direção N17°E; 54°SE, (figura 6.29) já que o polo de nenhuma descontinuidade encontra-se próxima ou inserida na área hachurada.

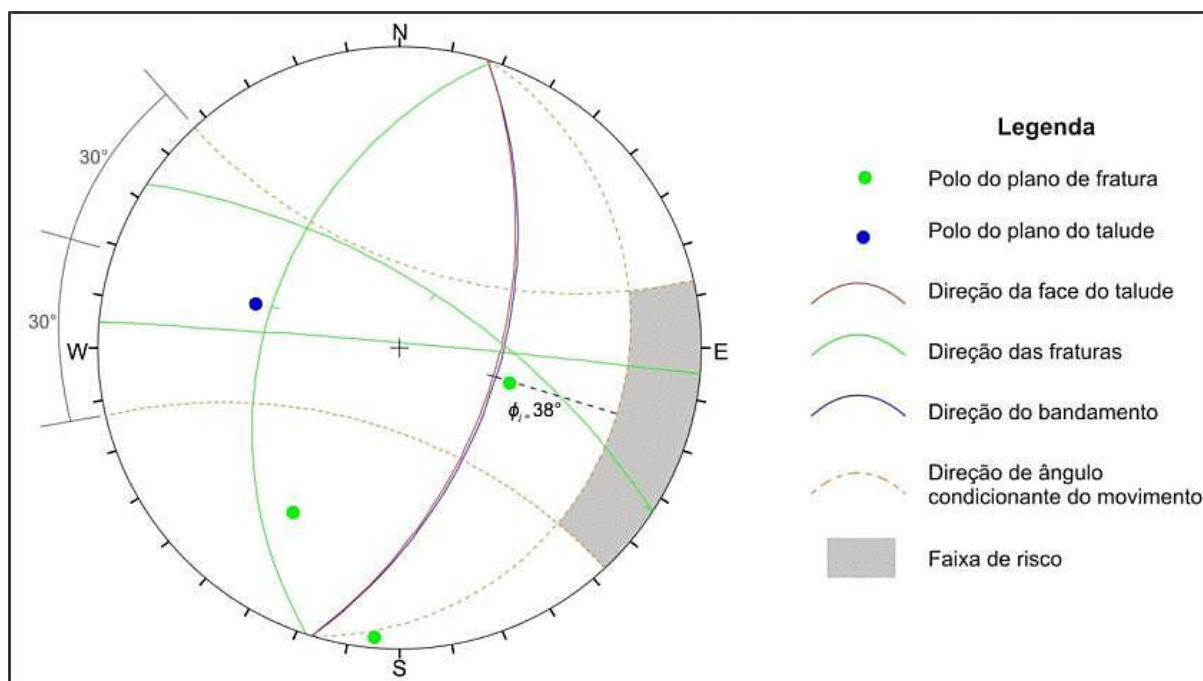


Figura 6.29 – Análise de ruptura por tombamento para o talude de direção N17°E; 54°SE.

Já para o talude  $T_2$ , a família de fratura  $F_1$  está sujeito à ocorrência de tombamento, por atender as condições indicadas por Goodman (1989). A fratura  $F_3$ , por sua vez, possui menores chances da ocorrência deste tipo de ruptura, já que não se encontra inserida nesta área. Contudo, devido à proximidade do polo com esta faixa, a variação que ocorre ao longo da mina da direção das fraturas e do ângulo do talude pode gerar situações de instabilização (figura 6.30).

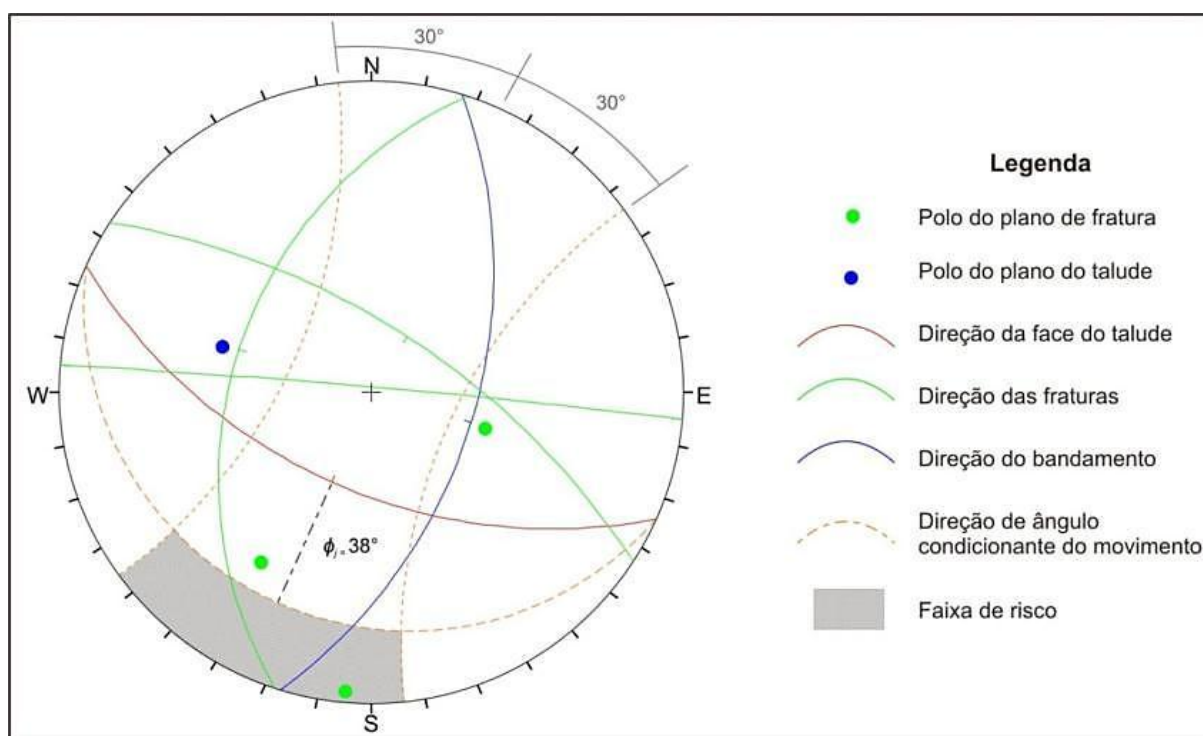


Figura 6.30 – Análise de ruptura por tombamento para o talude  $T_2$ , de direção  $N66^\circ W$ ;  $55^\circ SW$ .

#### 6.2.4.4 Rupturas circulares

A ruptura circular é mais comum em solos, contudo, se um maciço rochoso pobre apresentar fraturas sem uma orientação espacial preferencial, este tipo de ruptura também pode vir a ocorrer. Devido ao alto grau de deformação dos itabiritos e sua baixa resistência, este tipo de ruptura acontece na mina São Luís, como mostra a figura 6.31.



Figura 6.31 – Rompimento circular observado na mina São Luís.

Contudo, por haver planos de descontinuidades bem marcados, um rompimento circular pode encontrar planos preferenciais, evoluindo para uma ruptura complexa, ou seja, envolvendo 2 tipos diferentes de rupturas.



### 6.2.5 Análise de estabilidade de taludes pelo método de equilíbrio limite

Para as análises utilizando o método de equilíbrio limite, foi selecionada a seção 3. Esta seção possui direção aproximadamente perpendicular à direção do bandamento, logo, esta estrutura apresentaria mergulho aparente o mais próximo do real. Também podemos assumir que, nesta seção, os esforços ao longo da ruptura representam uma situação na qual os parâmetros de ângulo de atrito e coesão obtidos se encontram nas condições mais críticas, paralela à direção do bandamento.

Devido a escassez de informações sobre o nível de água, foram consideradas 3 situações distintas dentro da mina São Luís. Primeiramente, Geoestrutural (2005) indica que a cota do nível de água na mina de Tamanduá encontra-se em torno de 850 metros e adota este valor para os itabiritos desta área. Baseado nesta informação foi analisado esta condição, limitando a pesquisa a 50 superfícies. Os resultados obtidos pelo WinStabl e Slide estão apresentados nas figuras 6.32 e 6.33 respectivamente.

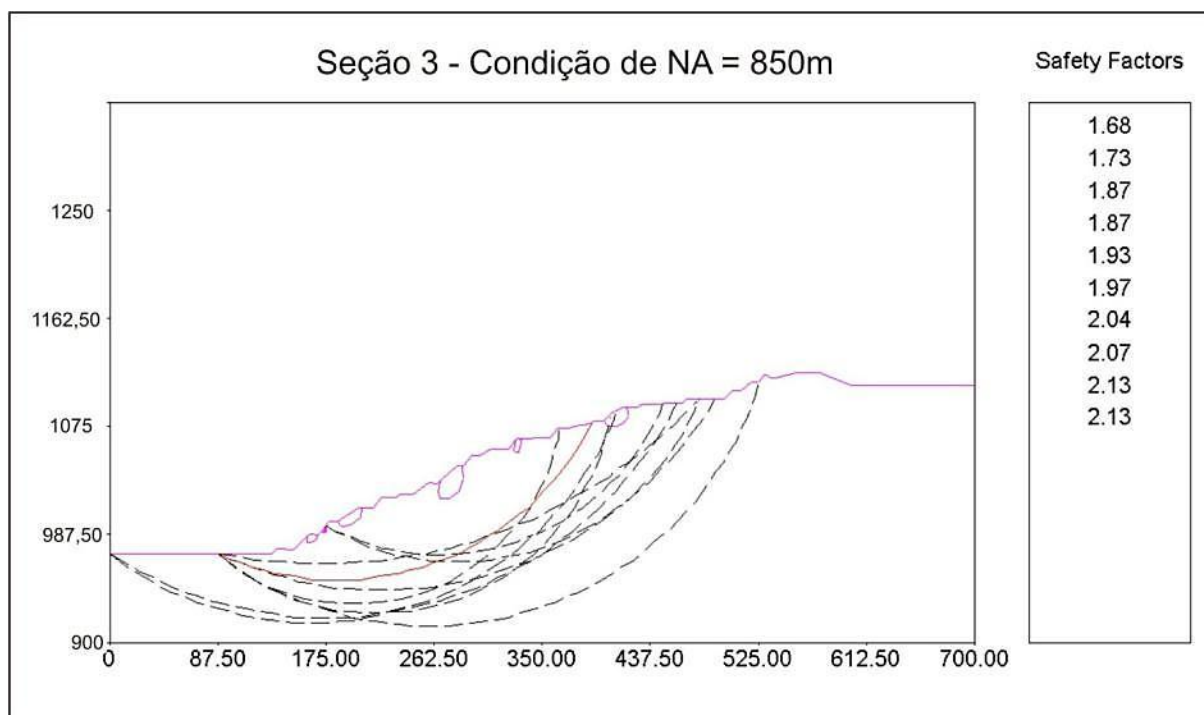


Figura 6.32 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa WinStabl.

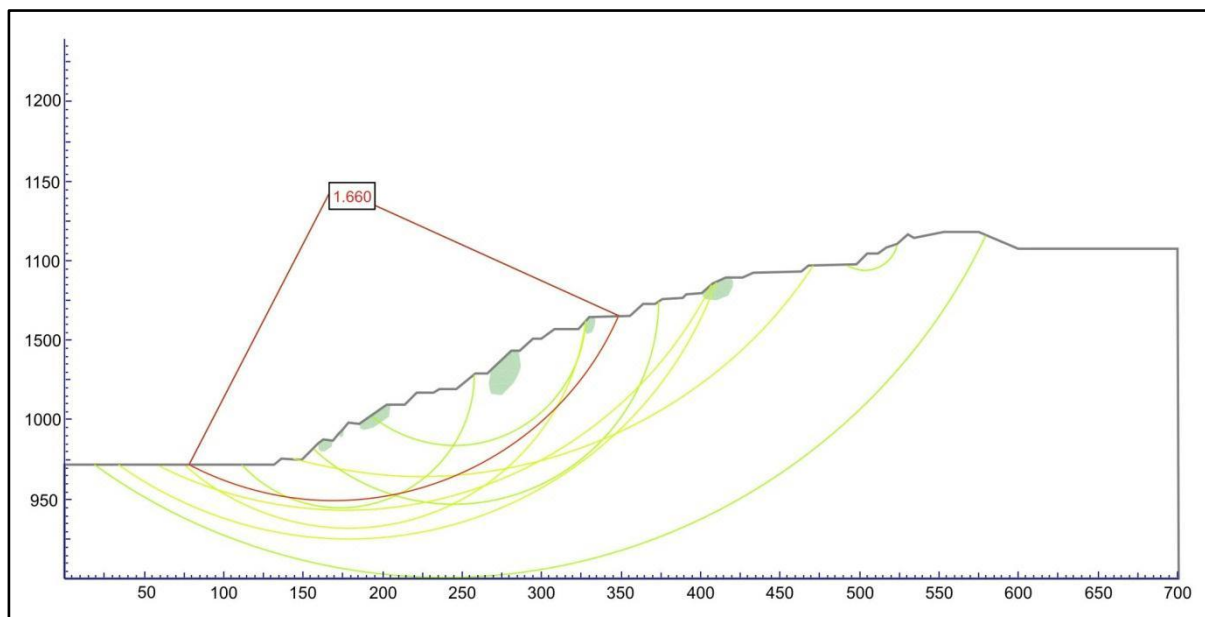


Figura 6.33 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide para pesquisa de 50 superfícies de ruptura.

Os valores mais baixos de fator de segurança (FS) apontados por ambos os programas são bastante próximos, apesar de apresentarem superfícies de ruptura diferentes. Entretanto, estas superfícies de ruptura se assemelham nos dois casos, pois abrangem diversos taludes da seção.

Posteriormente, foi realizada uma análise para as mesmas condições de contorno anteriores, contudo, abrangendo à busca para as 5000 superfícies mais críticas. Diferentemente do resultado anterior, o programa aponta uma superfície crítica que afeta apenas 4 taludes apresentando o fator de segurança de 1.44, apontando uma situação de maior risco, como indica a figura 6.34.

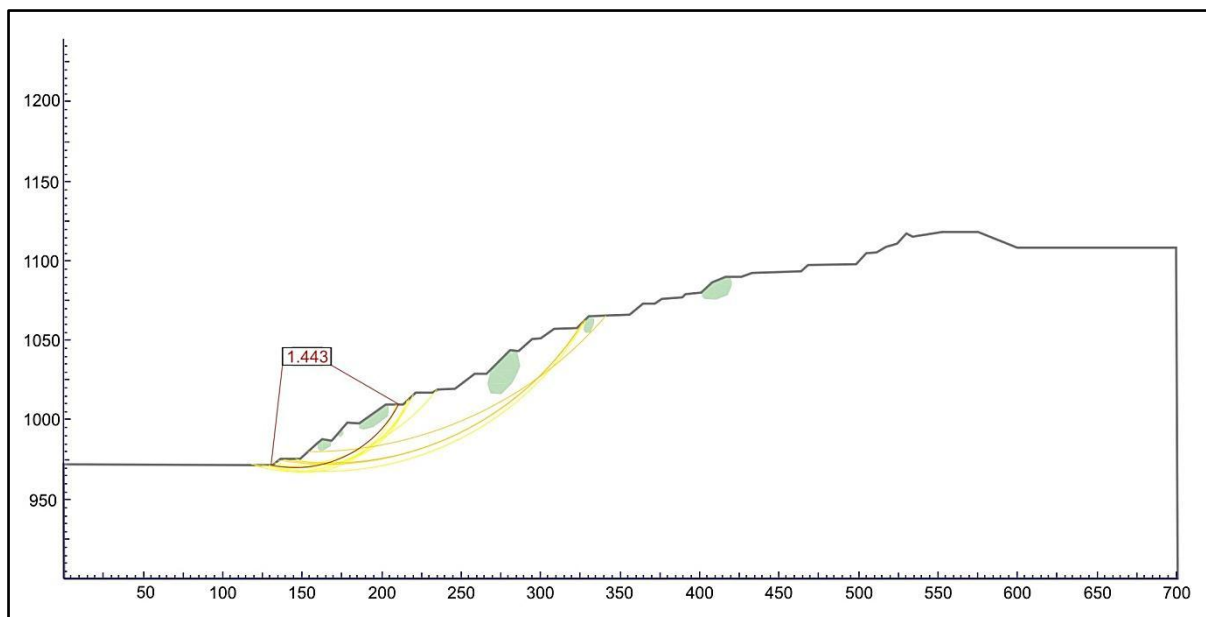


Figura 6.34 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide para pesquisa de 5000 superfícies de ruptura.

Devido ao baixo valor de cota do NA, este parâmetro não influencia na estabilidade da seção em questão. Os fatores de segurança mais baixos, calculados através da primeira pesquisa, indicam valores 68% e 66% acima da condição de ruptura ( $FS = 1$ ), enquanto que ampliando a procura de planos de instabilidade, o menor valor encontrado está 44% acima da condição limite.

Posteriormente, foi considerando uma segunda condição, em que o nível de água foi aumentado em 100 metros, ou seja, atingindo a cota de 950 metros. A pesquisa por 50 superfícies de ruptura está apresentada na figura 6.35.

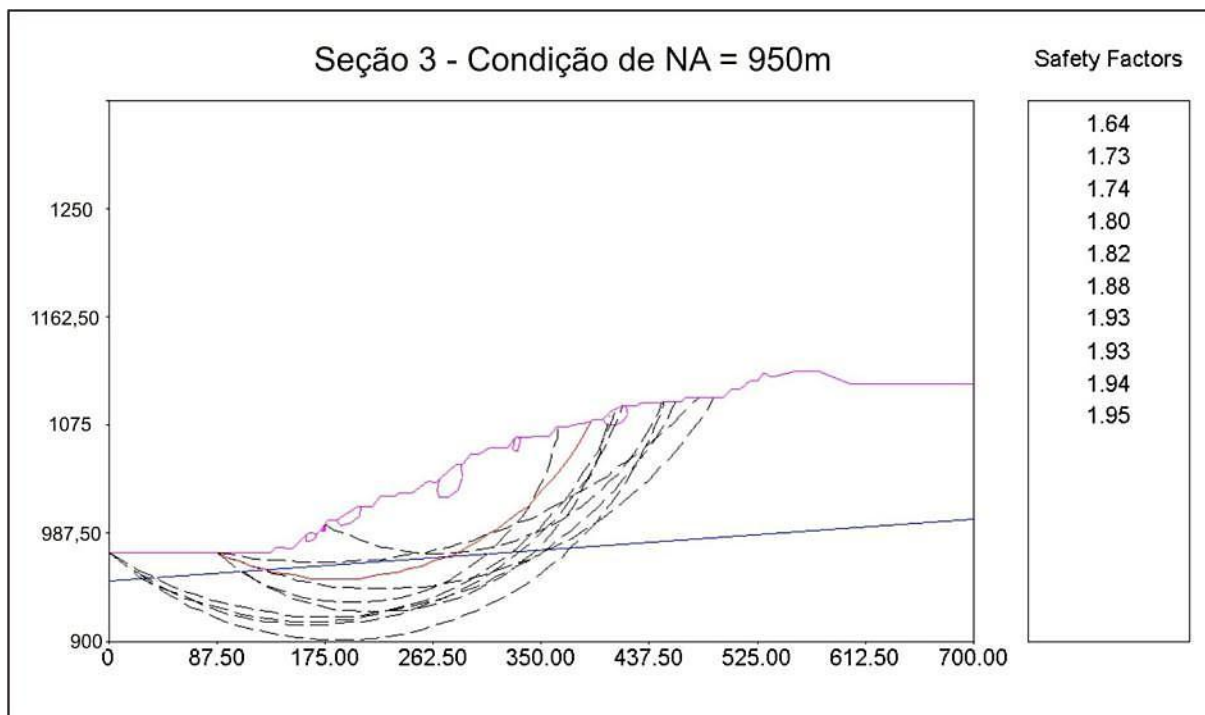


Figura 6.35 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 950 metros utilizando o programa WinStabl.

Como se observa pela figura, este aumento no nível de água corta parcialmente o plano de ruptura mais crítico, ainda não tendo grande influência sobre a estabilidade do talude. Os valores de fator de segurança ainda são altos, estando a 64% acima do valor de ruptura.

Utilizando uma pesquisa mais abrangente, a superfície que apresenta o mais baixo valor do FS não é afetado por este aumento do NA, apresentando o mesmo plano e FS da primeira condição de NA analisada, como indicado pela figura 6.36.

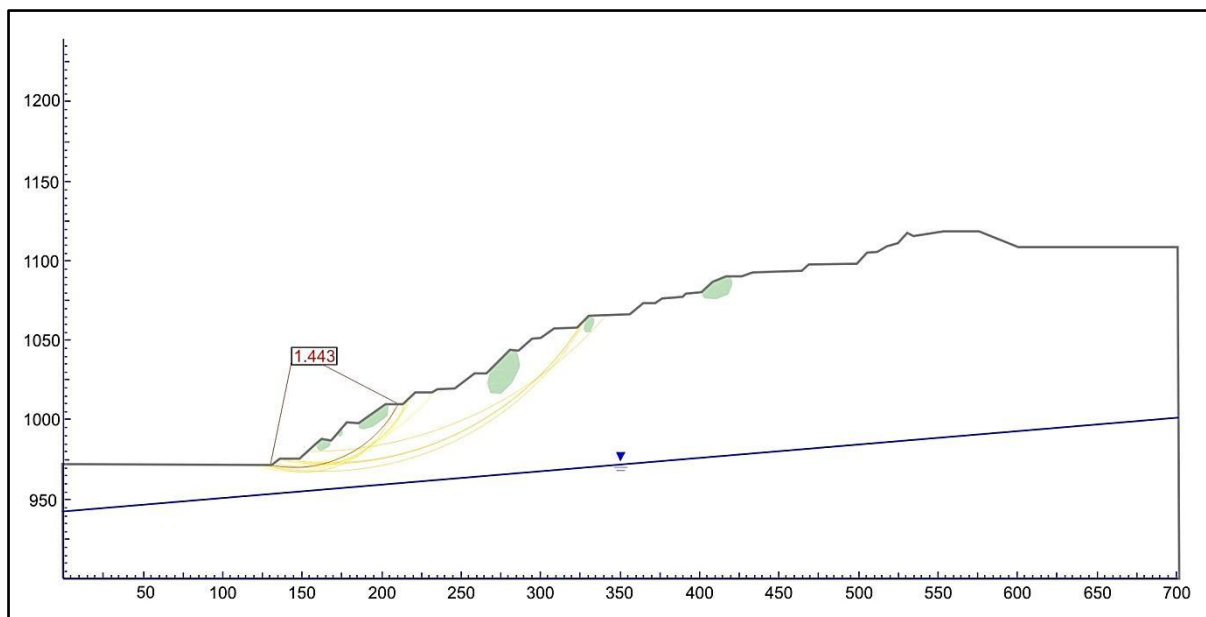


Figura 6.36 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide.

Em uma terceira situação, foi considerada a hipótese do nível de água atingir a cota de 1000 metros. A análise de estabilidade identificando 50 superfícies de ruptura está apresentada na figura 6.37.

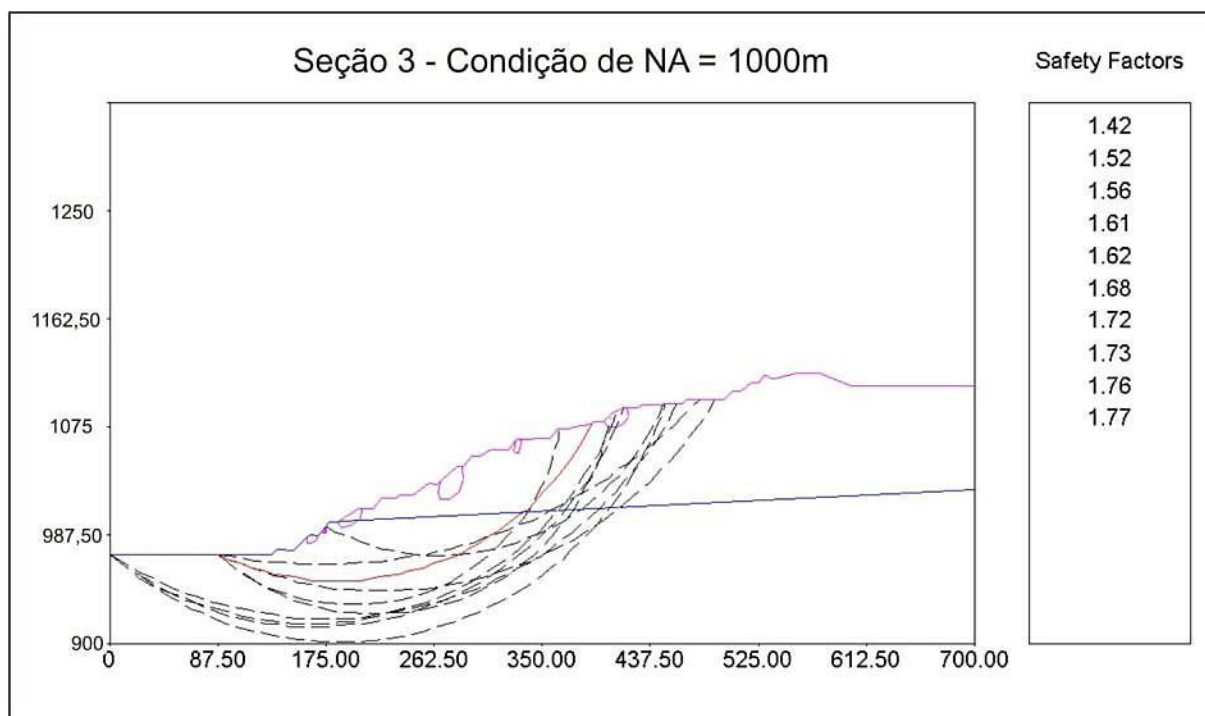


Figura 6.37 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 1000 metros utilizando o programa WinStabl.

Nesta condição, observa-se uma diminuição considerável do fator de segurança com relação às outras duas situações. Contudo, o FS ainda apresenta um valor relativamente elevado, estando 42% acima do valor de ruptura.

Por sua vez, abrangendo a pesquisa de superfícies de instabilidade, a superfície crítica atingiu o valor de fator de segurança igual a 1, conforme indicado na figura 6.38.

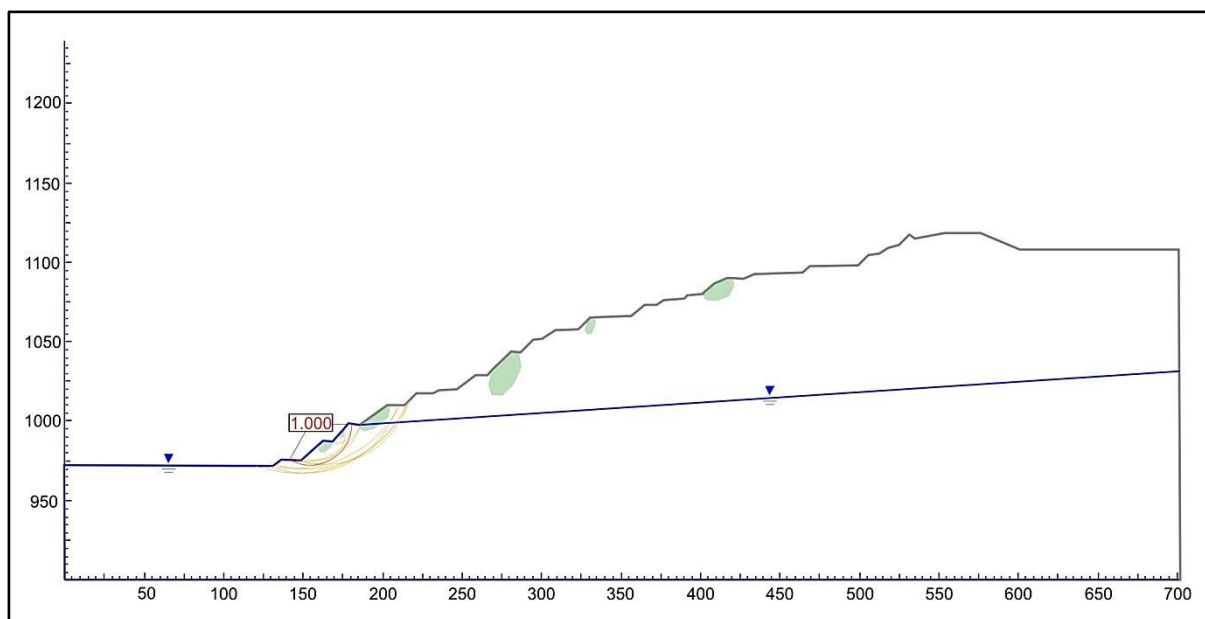


Figura 6.38 – Análise de estabilidade na seção 3 considerando o nível de água na cota 850 metros utilizando o programa Slide.

Utilizando o programa Slide, também foram comparadas as superfícies de instabilidade obtidas pelos métodos simplificados de Janbu e Bishop. Esta análise foi realizada em duas das situações apresentadas anteriormente, considerando o nível de água na cota de 850 e de 1000 metros, e estão apresentados na figura 6.39. Os valores de FS em vermelho foram obtidos através do método de Janbu simplificado, enquanto que os FS em verde indicam os resultados pelo método de Bishop simplificado.

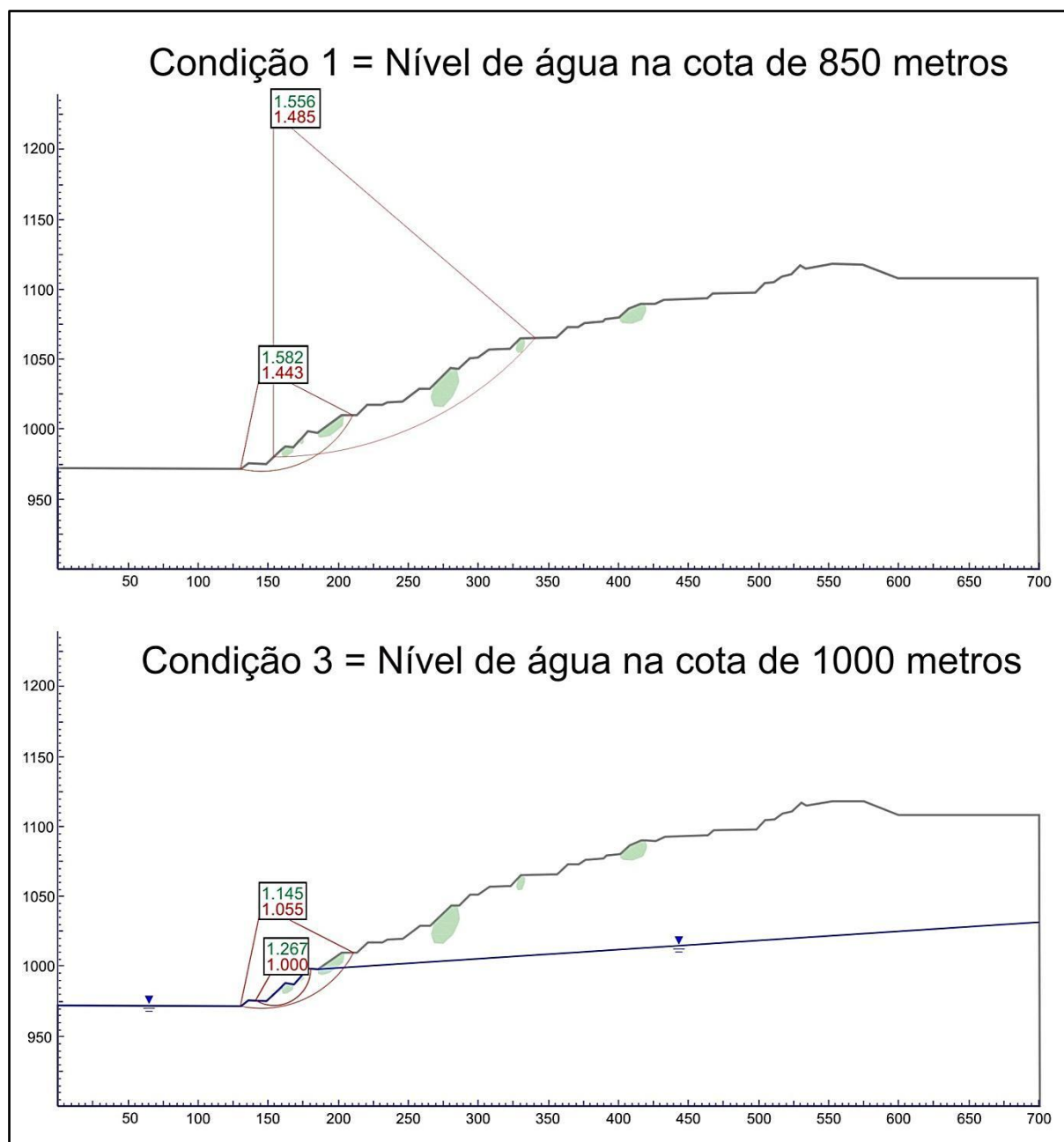


Figura 6.39 – Comparação entre as análises de estabilidade pelos métodos de Janbu (cor vermelha) e Bishop (cor verde).

Em comparação com o método simplificado de Janbu, o método de Bishop apresentou um FS mais baixo para uma superfície diferente. Contudo, no geral o método simplificado de Bishop apresentou valores de FS superiores aos Janbu.

Para efeito de comparação, foram realizadas análises de estabilidade considerando os parâmetros de coesão e ângulo de atrito para quando o material se encaixar na classe IV e em condição de obliquidade e paralelismo a foliação. O resumo das análises realizadas está apresentado na tabela 6.6.

Primeiramente, abrangendo a pesquisa para um maior número de superfícies foram encontrados fatores de segurança mais baixos que quando se impõe um limite. Ambos os programas indicam valores de FS e superfícies de ruptura semelhantes, entretanto não idênticos. Comparando os métodos simplificados de Janbu e Bishop, o primeiro indicou valores menores de FS.

Tabela 6.6 – Fatores de segurança mínimos para diferentes fatores de coesão, ângulo de atrito e nível de água para a seção 3.

Classe maciço	Parâmetros			Nível de água (m)	Fatores de segurança mínimo			
	Relação com a foliação	C' (KN/m <sup>2</sup> )	φ' (Graus)		WinStabl*	Slide*	Slide**	
							Janbu Simplificado	Bishop Simplificado
IV	Oblíquo	150	40	850	2.72	2.72	2.56	2.76
IV	Paralelo	30	32	850	1.81	1.78	1.55	1.66
V	Obliquo	80	38	850	2.38	2.36	2.17	2.29
V	Paralelo	30	30	850	1.68	1.66	1.44	1.55
V	Paralelo	30	30	950	1.64	1.63	1.44	1.55
V	Paralelo	30	30	1000	1.42	1.33	1.00	1.14

\*Pesquisa de 50 superfícies de ruptura

\*\*Pesquisa de 5000 superfícies de ruptura



## 7 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou duas abordagens para o estudo e caracterização das minas do complexo Fazendão. Primeiramente foram gerados mapas de declividade, direção de vertente, curvatura e o mapa geológico para uma caracterização semi-regional das minas e do seu entorno. Complementarmente, foi realizado um estudo de detalhe, focado na mina São Luís, que abordou a caracterização do maciço e a análise de estabilidade de taludes utilizando estereogramas e equilíbrio limite.

O método de análise utilizado possibilitou uma compreensão da área em que as minas se situam, fornecendo informações importantes para o planejamento do avanço da mina. O conhecimento das declividades da região, assim como o comportamento e as principais direções de vertentes permite que sejam realizadas interferências sobre o ambiente de forma prática e direta, maximizando o tempo e recursos investidos e diminuindo impactos gerados sobre a natureza. O SIG foi uma ferramenta essencial para esta análise, auxiliando a geração de informações importantes a partir da topografia e permitindo a integração destes dados para uma interpretação mais precisa dos mapas temáticos.

Os dados estruturais coletados em campo permitiram a individualização de 3 famílias de descontinuidades principais e as suas características. Analisando em estereogramas estas descontinuidades, juntamente com o bandamento e as principais direções de taludes, identificaram-se situações em que suas interações possibilitam a instabilização, seja tombamento, movimento em cunha ou deslizamento planar, sendo várias destas feições observadas em campo.

As análises por equilíbrio limite indicaram que os menores fatores de segurança apresentados estão relacionados a rupturas que afetam poucos taludes da cava. As rupturas que atingem toda a seção analisada apresentaram fatores de segurança muito altos, indicando que é improvável que uma ruptura deste tipo ocorra. Entretanto, mesmo sendo considerado pequenas superfícies de instabilização, os valores de fator de segurança identificados foram relativamente altos, caso não ocorra a influência do nível de água. Isto corrobora com os resultados obtidos a partir da análise dos estereogramas, e o que foi identificado em campo. Comparando os métodos simplificados de análise, o método de Janbu apresentou valores de FS inferiores que o método de Bishop. Além disto, ambos os métodos indicaram menor valor do FS para superfícies distintas, reforçando a

importância da utilização de diferentes abordagens no estudo de caracterização da estabilidade.

Comparando os resultados obtidos, o presente método atendeu aos objetivos propostos, dentro da intenção deste trabalho que é a caracterização e estudo de estabilidade de taludes por diferentes abordagens, envolvendo uma análise do contexto semi-regional da mina e uma caracterização de detalhe.

Para um refinamento nas análises estabelecidas, sugere-se um levantamento topográfico regional uniforme, evitando a compilação de diferentes levantamentos para evitar conflito entre as curvas de nível, e assim aumentar a confiabilidade das análises regionais. Para a validação dos mapas gerados, recomenda-se a verificação da cota de alguns pontos in situ, principalmente aqueles que apresentaram valores de RMS acima da média para validar o MDT gerado.

Quanto às análises de detalhe, os parâmetros geotécnicos utilizados apresentam uma boa confiabilidade, comparando com outros trabalhos realizados nas minas do quadrilátero ferrífero, como o trabalho de Ventura (2009). Entretanto, o relatório apresentado pela Geoestrutural (2005) indica que os ensaios não especificam bem o tipo de amostra utilizada. Desta forma, recomenda-se a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento para estabelecer apropriadamente quais são o ângulo de atrito e coesão específicos para cada material das minas estudadas. Além disto, determinar os ângulos de atrito de cada família de descontinuidade irá permitir um refinamento nas análises de estabilidade. Somado a isto, informações de furos de sondagem permitiriam uma melhor modelagem do perfil das seções e, conseqüentemente, apontaria um resultado mais confiável quanto as análises de estabilidade.

## REFERÊNCIAS

ABRÃO, P. C.; OLIVEIRA, S. L. **Mineração**. São Paulo, ABGE. p. 431-438. 1998

ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v.90. p. 29-58, 1998.

ANJOS, D. S.; MENEGUETTE, M. J.; NUNES, J. O. R. Classificação da curvatura de vertentes em perfil via Modelo Numérico de Terreno. 2011. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR, Curitiba, PR. **Anais...** Brasil INPE. p. 2286-2293.

ANTENUCCI, J. C.; BROWN, K.; CROSSWELL, P. L.; KEVANY, M. J.. **Geographic information systems: a guide to the technology**. New York: Chapman and Hall. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: Estabilidade de Taludes e Encostas. Rio de Janeiro, 2006. 33p.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológica Geotécnica voltada a estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ABGEPCRJ. v. 2. 1992. p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O. Deslizamientos. In: Repetto, F.L.; Karez, C.S. (Org.). **ASPECTOS GEOLOGICOS DE PROTECCION AMBIENTAL**. 1 ed. Montevideo, Uruguai: Unesco, 1995, p.29-48.

AUGUSTO FILHO, O. Análise de métodos de interpolação de modelo digital de terreno e aplicação em SIG de gestão de riscos geotécnicos e ambientais em oleodutos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo : ABGE, 2011. v. 1. p. 1-9

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de Taludes. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, ABGE. 1998, p. 243-269.

BARTON, N. Progressive failure of excavated rock slopes. In SIMPOSIUM ON ROCK MECHANICS: STABILITY OF ROCK SLOPES, 13, 1971, Urbana, Illinois. **Proceedings...** New York: Asce. 1971. p. 139-169.

BARTON, N.; LEIN, R.; LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. **Rock Mechanics**, v.6, n.4. 1974. p. 189-236.

BIENIAWSKI, Z. T.. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling. **Proceedings.... 3<sup>rd</sup> Congress International Society of Rock Mechanics**, Denver, 2, Part A. 1974. p 27-32.

BIENIAWSKI, Z. T. Rock mass classification in rock engineering. In: Exploration for rock engineering. 1976. **Proceedings... SYMPOSIUM ON EXPLORATION FOR ROCK ENGINEERING**. Cape Town: Balkema. v. 1, 1976. 97-106.

BIENIAWSKI, Z. T. The geomechanics classification in rock engineering applications. In: CONGRESS INTERNATIONAL SOCIETY ON ROCK MECHANICS, 4., 1979, Montreux. **Proceedings... ISRM**, v.2. 1979. p. 41-48.

BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering rock mass classification: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering**. Nova York: John Wiley & Sons. 1989. 251p.

BRABB, E.E. **The world landslide problem. Episodes**, v.14, n.1, 1991. p.52-61.

BURROUGH, P. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Clarendon. In: press. 1986

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: DPI/INPE. 2001. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>> (acessado em 26 de janeiro de 2012).

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.M.V. Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. In CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: DPI/INPE. 2001. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>> (acessado em 26 de janeiro de 2012).

CÂMARA, G. et al. Anatomia de sistemas de informação geográfica. Escola de Computação, SBC. 1996. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/anatomia.pdf>> (acessado em 26 de janeiro de 2012).

CANCINO CALLE, J. A. **Análise de ruptura de talude em solo não saturado**. 2000. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CATAS ALTAS, Geografia, Site da cidade de Catas Altas. Disponível em <<http://www.catasaltas.mg.gov.br/index.php/a-cidade/geografia.html>> Acessado em 20 de outubro de 2011.

CELESTINO, T. B.; DINIZ, N. C. Informática. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, ABGE 1998, p. 227-241.

CHRISTOFOLETI, A. **Geomorfologia**. São Paulo, Bluscher. 2a edição. 10a impressão. 1980. 188p.

CIVIDINI, A.; GIODA, G.; CARINI, A. A finite element analysis of the time dependent behaviour of underground openings. **Computers and Geotechnics**. 1991. p. 1449-1454.

COSTA NUNES, A. J. da. Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms. *In*: Congresso internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 7º, **Anais...** México. v. 2, 1969. p. II. (Publicação 338).

DE MELLO, V. F. B. – **Toughts on soil engineering applicable to residual soil**. *In*: ASCE, 13, SASSE, Hong Kong, 1972. p. 5-33.

DE CAMPOS, T. M. P. **Análise de estabilidade: métodos, parâmetros e pressões neutras**, Relatório Técnico, Departamento de Engenharia Civil, PUC/RJ, Rio de Janeiro. 1985.

DEERE, D. U.; PATTON, F. D. **Slope stability in residual soils**. Fourth Panam. Conf. SMFE, San Juan, Puerto Rico, 1. 1971. 87-170.

DIAS, A. R. S. **Mecanismos de instabilidade nos maciços do Pico de Itabira, Mina do Pico, Itabirito - MG**. 1996. 177f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

DUTRA, G.M.; RUBBIOLI, E.L.; HORTA, L.S. Gruta do Centenário, Pico do Inficionado (Serra da Caraça), MG - A maior e mais profunda caverna quartzítica do mundo. *In*: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M.L.C. (Edits.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v.01: 2002. p. 431-441.

DYLIK, J. Notion du versant en geomorphologie. Bull. Acad.Pol. Sci. Série des Sc.Geol.Geogr., 16(2). 1968. p.125-132.

Environmental System Research Institute – ESRI. 2007. Arcgis desktop 10 help – **The geographic information system (GIS) for everyone**. 2007. 400p.

FREIRE, E.S. de Magalhães. **Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática**. Construção, Rio de Janeiro (95) 1965 p.10-18.

FRIGERIO, G. P. **Retroanálise de uma escavação de vala escorada a céu aberto de uma linha do metrô de São Paulo**. 2004. 268f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

GAMA, C. D. Métodos Computacionais de Projetos de Taludes em Mineração. São Carlos. Tese de Livre Docência. 1984.

GEOESTRUTURAL. **Complexo Fazendão Mina São Luís Tamanduá-Almas. Análises de estabilidade dimensionamento dos taludes**. Relatório técnico interno. Catas Altas, MG. 2005. 90 p.

GOMES, R. C. **Classificação geomecânica de maciços rochosos**. São Paulo, EESC-USP, 1991, 37p.

GOODMAN, R. E. (1989). **Introduction to rock mechanics**. 2 ed. John Wiley & Sons, New York. 562p.

GOODMAN, R. E.; BRAY, J. W. Toppling of rock slopes. In SPECIALTY CONFERENCE: ROCK ENGINEERING FOR FOUNDATIONS AND SLOPES, 1976, Boulder, Colorado. **Proceedings**... New York: ASCE, v.1. 1976. p. 201-234.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo. Edgard Blucher. 1976. p. 170.

HOEK, E. Estimando a estabilidade de taludes escavados em minas a céu aberto. Tradução n.4, APGA, São Paulo. 1972. p. 58.

HOEK, E. **Strength of jointed rock masses: rankine lecture.** *Geotechnique*, v.33, n.3. 1983. p.187-223.

HOEK, E.; BRAY, J. W. **Rock Slope Engineering.** Institute of Mining and Metallurgy, London. 1981.

HOEK, E.; LONDE, P. Surface Workings in rock. In: INTERNATIONAL CONGRESS FOR ROCK MECHANICS, 3, 1974, Denver. **Proceedings...** Washington: National Academy of Sciences. v. 1. 1974. p. 613-654.

HUTCHINSON, J. N. **Mass movement.** In: ENCYCLOPEDIA OF GEOMORPHOLOGY. Ed. Fairbridge, R. W. (2ed.). Reinhold Book Co. New York. 1968.

HUTCHINSON, J. N.; GENS, A.; CAVOUNIDIS, S. Three dimensional analysis of slides in cohesive soils. **Geotechnique**. v: 38. 1988 p. 1 – 23.

IPT. **Estudos Geológicos Geotécnicos para a Caracterização e classificação de maciços rochosos para projetos de engenharia (túneis, lavra a céu aberto e barragens).** São Paulo. (IPT – Relatório, 19569). 1984.

ISRM. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics Science and Geomechanics*. Abstract. v. 15, 1978. p. 319-368.

ISRM. Rock Characterization Testing and Monitoring. E. T. Brown, 1981. 211p.

JESUS, A. C. de. **Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados.** 2008. 284 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LAUBSCHER, D. H. **Geomechanics classification of jointed rock masses – mining applications.** *Trans. Instn Min. Metall.* 93, A70 – A82.. 1977.

LAUBSCHER, D. H. A geomechanics classification system for the rating of rock mass in mine design. **Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy**. v.90, n. 10, 1990. p. 257-273.

LOPES, M. C. **Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas – Mina Córrego do Sítio.** 2006. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Departamento de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto,

Ouro Preto, 2006. Disponível em [http://www.tede.ufop.br/tde\\_arquivos/15/TDE-2006-11-28T08:35:10Z-99/Publico/Manoel%20da%20Conceicao%20Lopes.pdf](http://www.tede.ufop.br/tde_arquivos/15/TDE-2006-11-28T08:35:10Z-99/Publico/Manoel%20da%20Conceicao%20Lopes.pdf). Acesso em 04 Abr. 2012.

LOPES, A. P. R. **Mapeamento do potencial de instabilização de taludes rodoviários usando SIG e seções geológico-geotécnicas de campo com aplicação na rodovia SP-310**. 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MAGALHÃES, F. S.; CELLA, P. R. C. Estruturas dos Maciços Rochosos. Geologia de Engenharia, São Paulo, ABGE, 1998. p. 39-55.

MATTOS, K. C. A. Processo de instabilização em taludes rodoviários em solos residuais arenosos: estudo na rodovia Castello Branco (SP 280), Km 305 a 313. São Carlos, SP. 2009

MORAES M. A. S. Reconhecimento de fácies sedimentares em rochas metamórficas da região de Ouro preto, Minas Gerais. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 3. Belo Horizonte. **Anais...** 1985. p. 84-93. (Boletim 5).

MULLER, L. The European approach to slope stability problems in open pit mines. **Proceedings...** 3<sup>rd</sup> Symposium on Rock Mechanics. Colorado School of mines quarterly, vol 54, n° 3, 1959. p. 116-133.

NAMIKAWA, L.M. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características**. 1995. 136p. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1995

OLIVEIRA, A. M. S. **Estudo da Percolação de água em Maciços Rochosos para o Projeto de Grandes Barragens**. São Paulo. Dissertação (Mestrado) – IG-USP. 1981.

Pacheco, P. G. M. **Análise Numérica do Fluxo e da Estabilidade de uma Pilha de Lixiviação de Minério de Cobre**. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro-RJ. PUCRIO. 2005. p. 54-59;

PITEAU, D. R.; MARTIN, D. C. Mechanics of rock slope Failure. *In*: International Conference on Stability in Surface Mining, 3, Vancouver. **Proceedings...** Vancouver, 1981. p.113-169.



REIS, R. C. **Estudo de estabilidade de taludes da mina de Tapira** – MG. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – NUGEO Universidade Federal de Ouro Preto. 2010.

RENGER F. E.; SUCKAU V. E.; SILVA R. M. P. Sedimentologia e análise de bacia da Formação Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil, In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 7. Belo Horizonte: 1993. **Anais...**Belo Horizonte, SBG:1983. p.41-45.

ROMANA, M. Nuevos factores de ajuste para la aplicación de la clasificación de Bieniawski a los taludes. In: COLOQUIO SOBRE INGENIERIA GEOLOGICA, 3, 1985, Barcelona. **Ponencias...** Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 1985. p. 139-153.

SÁ, G. **Caracterização lito estrutural e parametrização geomecânica das superfícies de ruptura em taludes na Mina de N4E – Carajás/PA.** 2010. 172 f. Dissertação (Mestrado). Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SAKURAI, S. Displacement measures associated with the design of underground openings. **Proceedings...** In: Int. Symp. On Field Measurements in Geomechanics, Zurich. 1983

SANT'ANNA, S. J. S.; NAMIKAWA, L. M. **Seleção de Subconjuntos de Pontos Amostrais em Modelos Digitais de Elevação.** In Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, abril 30, 2011. Curitiba. INPE, 2011. p. 2491-2498.

SANTOS, A. R. Aspectos metodológicos da análise geológico-geotécnica na estabilidade de taludes. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3, Itapema, **Anais...** ABGE, Volume 2, 1981. p. 409-412.

SCARPELLI, A. G. **Classificação geomecânica aplicada à avaliação da estabilidade de taludes em minas de ferro do quadrilátero ferrífero.** 1994. 187 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

SELBY, M. J. **Hillslope Materials & Processes.** Oxford: Oxford University Press, 1990.

SERRA JUNIOR, E.; OJIMA, L. M. Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, ABGE 1998, p. 211-226.

SHARPE, C. F. S. **Landslides and Related Phenomena**. New York. Columbia University Press, 1938. 137 p.

SILVA, A. B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas**. Editora da Unicamp. Campinas. 1999. 250p.

SILVA, P. A. D. 2000. **Estudos Geotécnicos na Recuperação Ambiental da Pedreira Municipal de Pirenópolis**. Dissertação de Mestrado, Publicação GDM-074ª/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p.

SILVEIRA, L. L. L. **Elaboração de carta de susceptibilidade à erosão das bacias dos rios Araraquara e Cubatão-SP, escala 1:50000**. 2002. 187 f. v1. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

SOUZA, L. A. P.; SILVA, R. F.; IYOMASA, W. S. Métodos de Investigação. **Geologia de Engenharia**, São Paulo, ABGE, 1998. p. 163-196.

STOCHALAK, J. The classification of slope deposit from engineering geological point of view. En: **Anais...** International Congress of Engineering Geology, 2, v.2: V27.1-V27.12. IAEG, 1974. São Paulo.

TERZAGHI, K. **Rock defects and loads on tunnel supports**. In Rock tunneling with steel supports, (eds R. V. Proctor and T. L. White) 1, 17-99. Youngstown, OH: Commercial Shearing and Stamping Company. 1946.

TERZAGHI, K. Mecanismos de escorregamento de terra. Trad. De Ernesto Pichler. São Paulo : Grêmio Politécnico. 1950. 41 p.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, 2003. p.539-546.

VARGAS, M. **Some engineering properties of residual clay soils occuring in Southern Brasil**. In: ICSMFE, 3 th, v1, 1953. Zurich.

VARGAS, M. Estabilização de Taludes em Encostas de Gnaisses Decompostos. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos. 3º, **Anais**. Belo Horizonte. Vol 1, seção 6, 1966. p. 32-44.

VARNES, D.J. 1978. Slope Movement types and processes. In: Landslides analysis and control. Washington: National Academy of Sciences. P.11-33.

VAZ, L. F. 1996. Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. Solos e Rochas, São Paulo. 19 (2): P117-136.

VENTURA, L. C. **Análise da influência de barreiras hidráulicas no padrão do fluxo e na estabilidade de taludes de cavas a céu aberto de minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, NUGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

WOLLE, C.M.. **Taludes naturais – mecanismos de instabilização e critérios de segurança.** 1980. 345 f. Dissertação (Mestrado), EPUSP, São Paulo. 1980.

WOLLE, C.M. Considerações de caráter metodológico sobre estabilização de taludes. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 3, 1981, Itapema. **Anais...** São Paulo: ABGE. v.2. 1981. p.409-412.

WOLLE, C. M. et al. **Peculiarities of “in situ” behavior of tropical soils: slope stability.** Committee on tropical soils. In: ICCTLSS, 1th, ISSMFE, Brasília. 1985.



## APÊNDICES

**APENDICE A – MAPA TOPOGRÁFICO**

**APENDICE B – MAPA LITOLÓGICO**

**APENDICE C – MAPA DE CURVATURA**



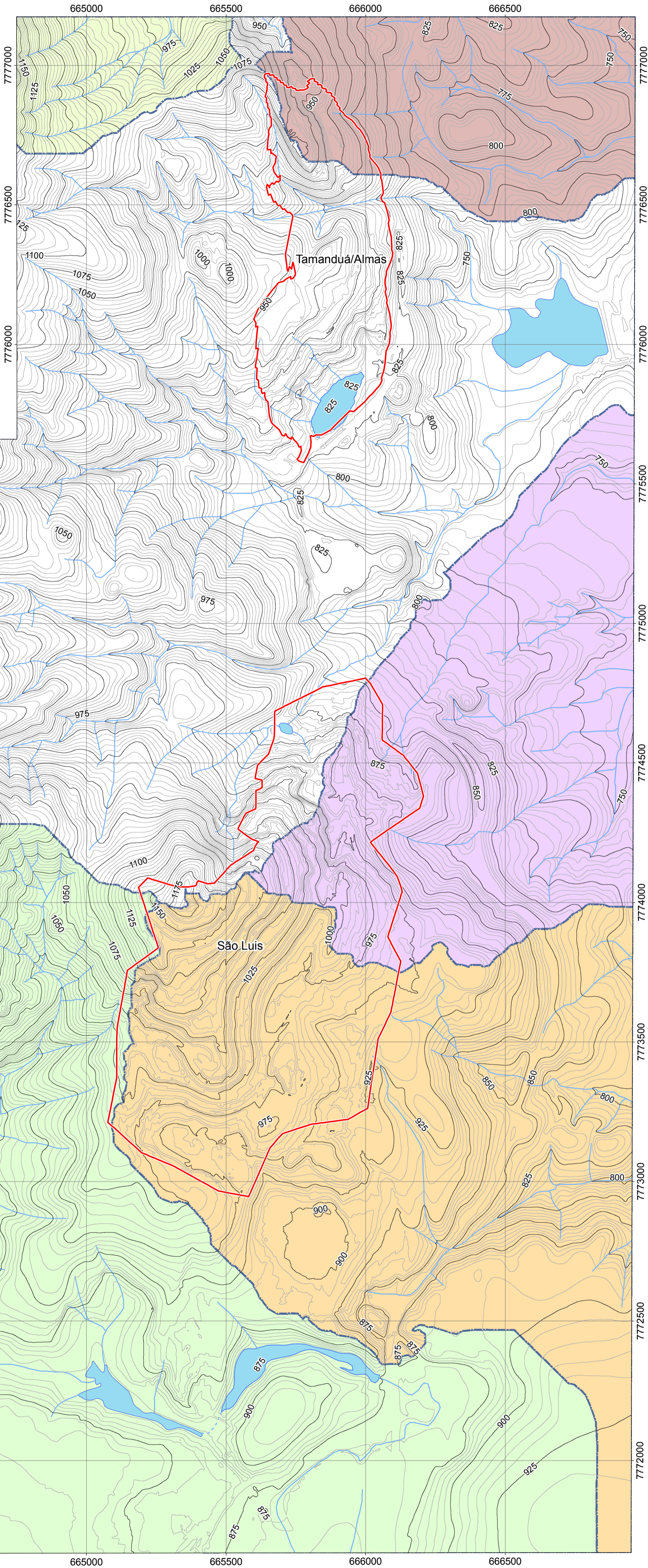
**APENDICE D – MAPA DE DIREÇÃO DE VERTENTE**

**APENDICE E – MAPA DE DECLIVIDADE**

**APENDICE F – MAPA TOPOGRÁFICO DE DETALHE DA MINA SÃO LUÍS**



Escola de Engenharia  
de São Carlos / USP



### Legenda

**Bacias**

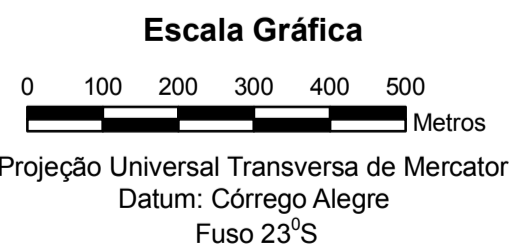
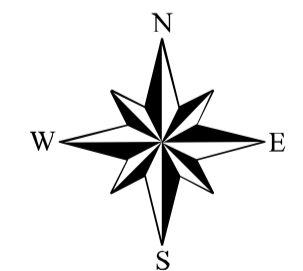
- Norte
- Nordeste
- Centro
- Leste
- Sudeste
- Sudoeste

### Convenções

- Limite das Minas
- Drenagem
- Drenagem Subterrânea
- Lagos

**Curvas de Nível**

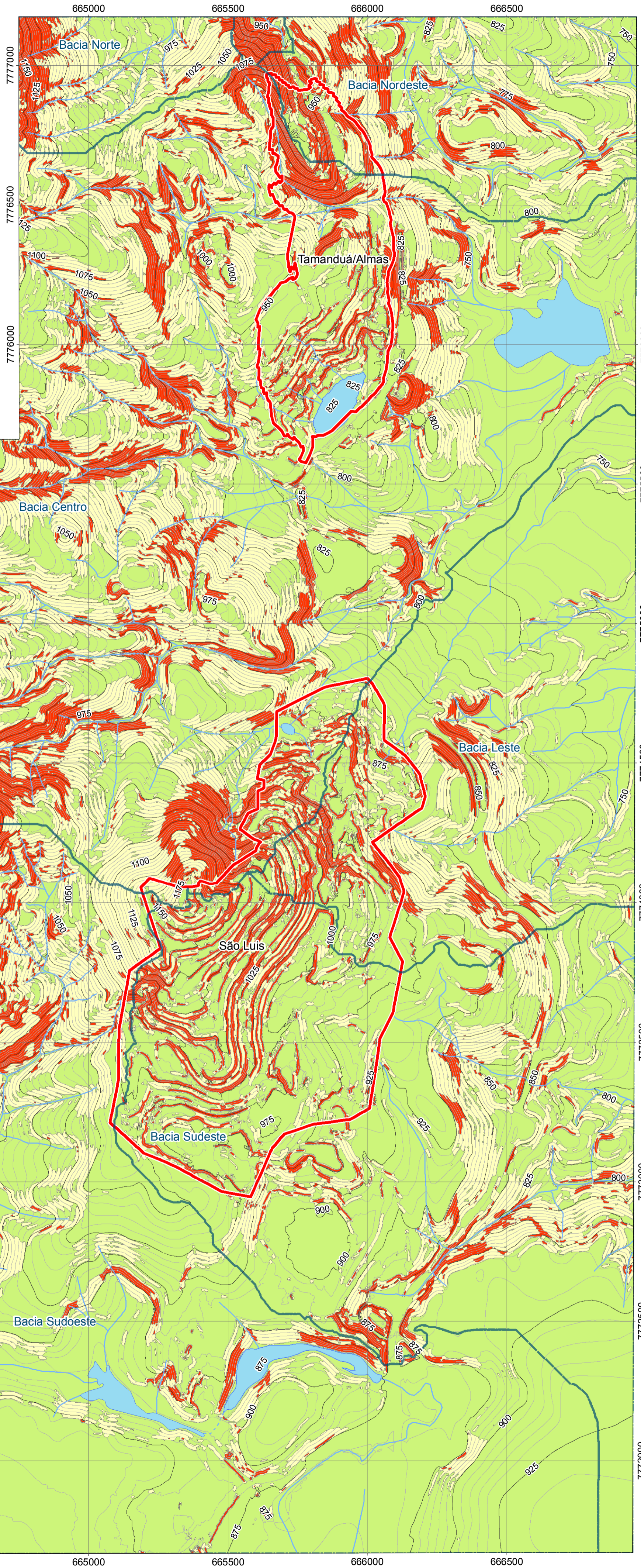
- Principais
- Intermediárias



Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luis em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.



Escola de Engenharia  
de São Carlos / USP



**Legenda**

**Declividade**

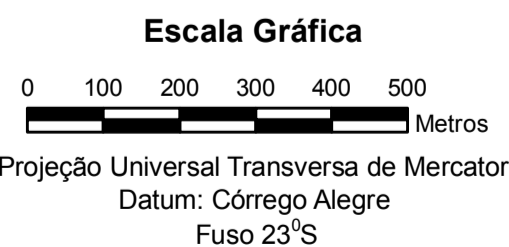
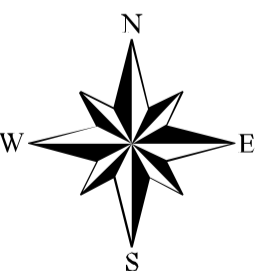
- 0° - 17°
- 17° - 30°
- 30° - 72°

**Convenções**

- Bacias
- Limite das Minas
- Drenagem
- Drenagem Subterrânea
- Lagos

**Curvas de Nível**

- Principais
- Intermediárias



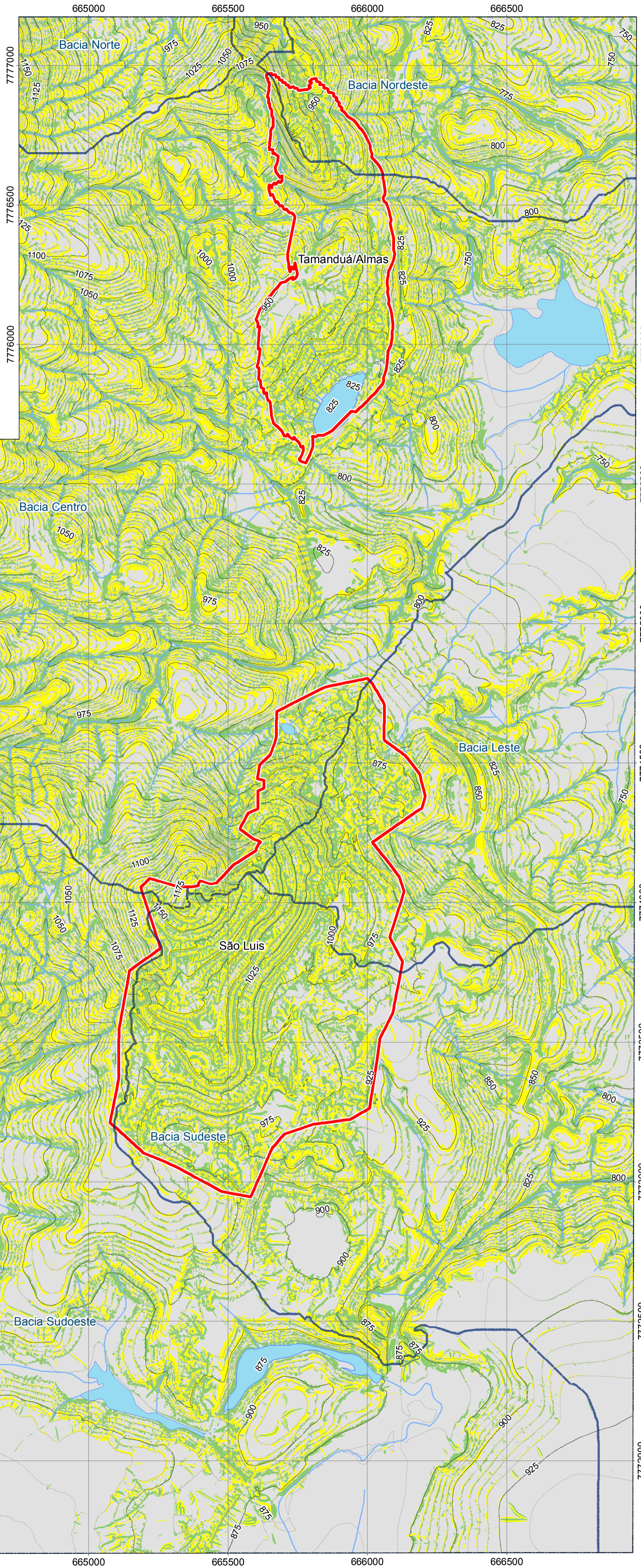
Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.

**Mapa de Declividade**

Autor: Ítalo Prata de Menezes  
Orientador: Oswaldo Augusto Filho  
Data: 10/07/2012 | Escala 1:10.000 | Apêndice B



Escola de Engenharia  
de São Carlos / USP



**Legenda**

**Curvatura**

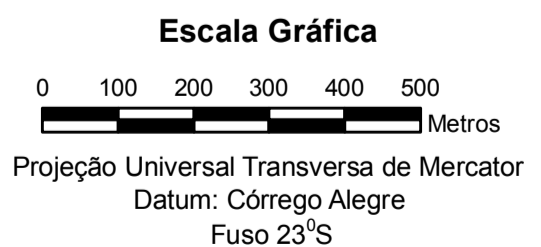
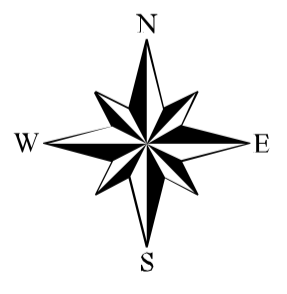
- Côncavo
- Retilíneo
- Convexo

**Convenções**

- Bacias
- Limite das Minas
- Drenagem
- Drenagem Subterrânea
- Lagos

**Curvas de Nível**

- Principais
- Intermediárias

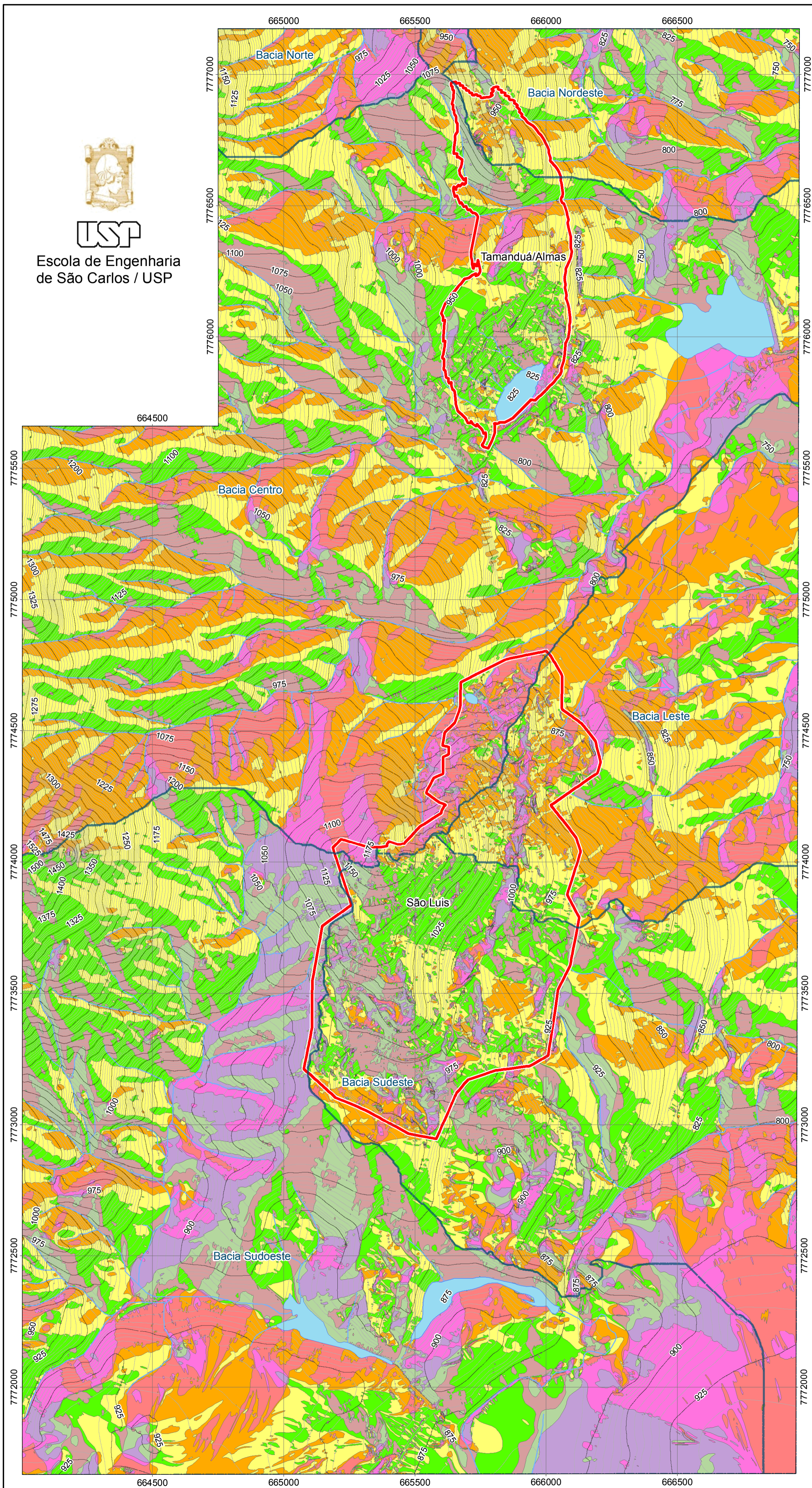


Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.



USP

Escola de Engenharia de São Carlos / USP



### Legenda

**Direção de Vertente**

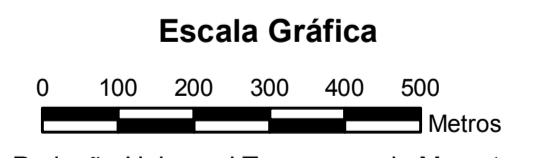
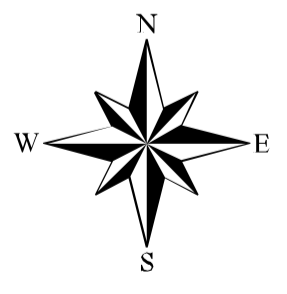
- Norte
- Nordeste
- Leste
- Sudeste
- Sul
- Sudoeste
- Oeste
- Noroeste

### Convenções

- Bacias
- Limite das Minas
- Drenagem
- Drenagem Subterrânea
- Lagos

**Curvas de Nível**

- Principais
- Intermediárias



Projeção Universal Transversa de Mercator  
 Datum: Córrego Alegre  
 Fuso 23°S

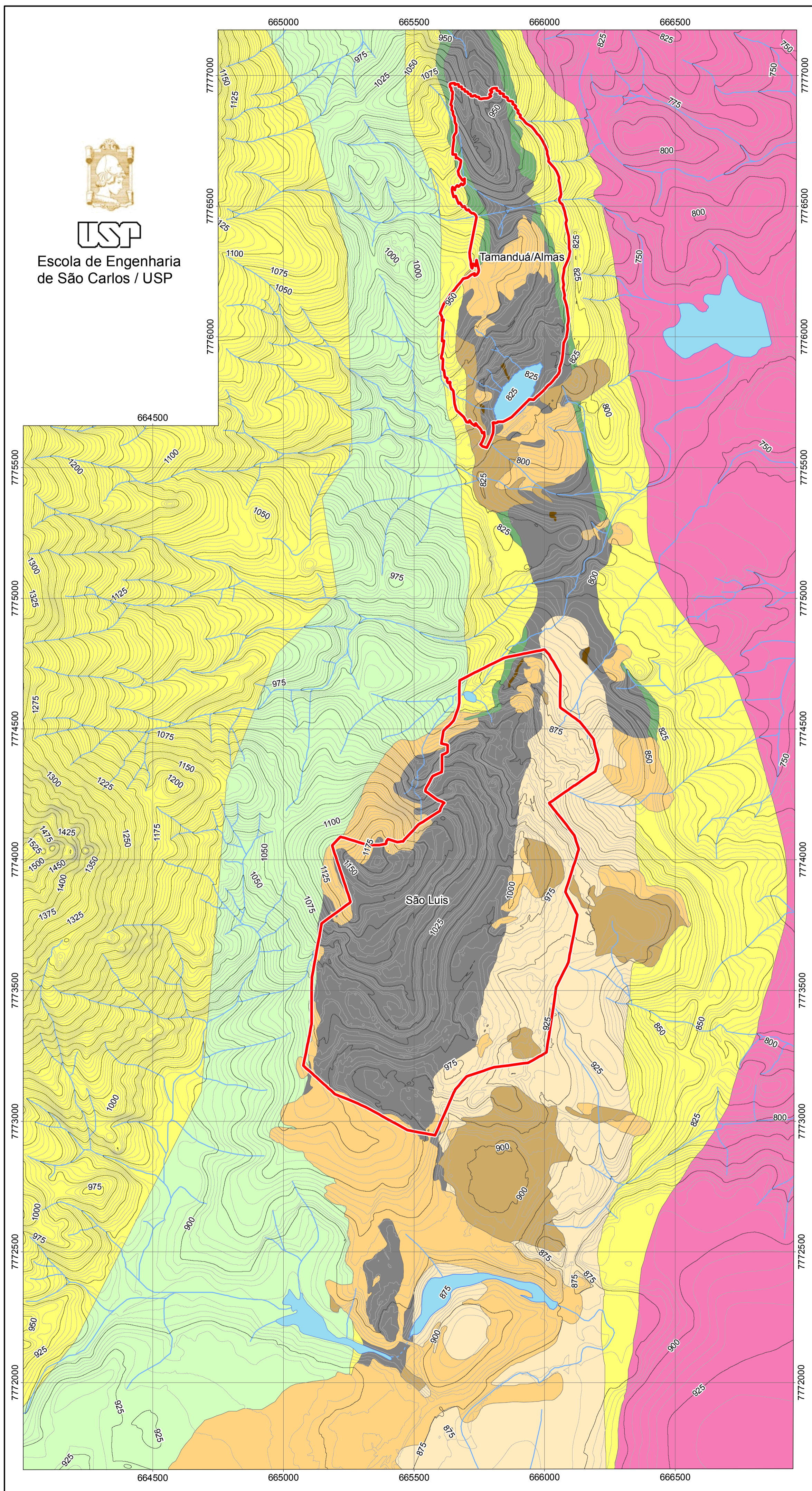
Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.

### Mapa de Direção de Vertente

Autor: Ítalo Prata de Menezes  
 Orientador: Oswaldo Augusto Filho  
 Data: 10/07/2012 | Escala 1:10.000 | Apêndice D



Escola de Engenharia  
de São Carlos / USP



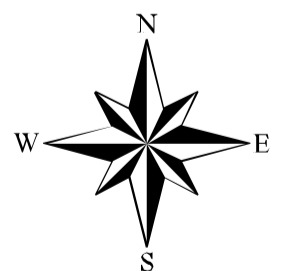
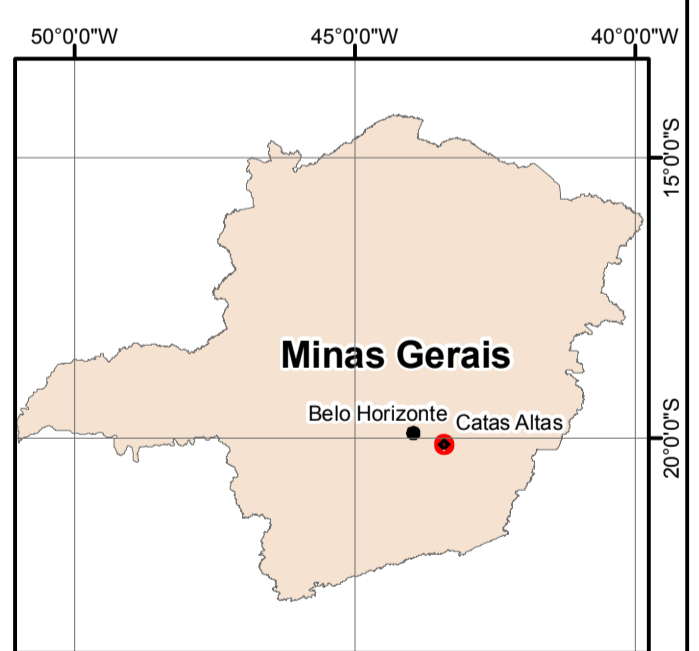
### Legenda

- Litologia**
- Depósitos Antrópicos
  - Coberturas Cenozóicas**
    - Canga
  - Supergrupo Minas (Proterozóico Inferior)**
    - Grupo Piracicaba**
      - Filito/Quartzito
    - Grupo Itabira**
      - Itabirito
    - Grupo Caraça**
      - Filito
      - Quartzito
  - Supergrupo Rio das Velhas (Arqueano)**
    - Grupo Quebra-Osso**
      - Xisto
  - Rochas Ígneas**
    - Gnaisse
    - Metamáfica Intrusiva

### Convenções

- Limite das Minas
- Drenagem
- Drenagem Subterrânea
- Lagos
- Curvas de Nível**
  - Principais
  - Intermediárias

### Localização da Área no Estado



### Escala Gráfica



Projeção Universal Transversa de Mercator  
Datum: Córrego Alegre  
Fuso 23°S

Estudo de estabilidade de taludes de mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.

### Mapa Litológico

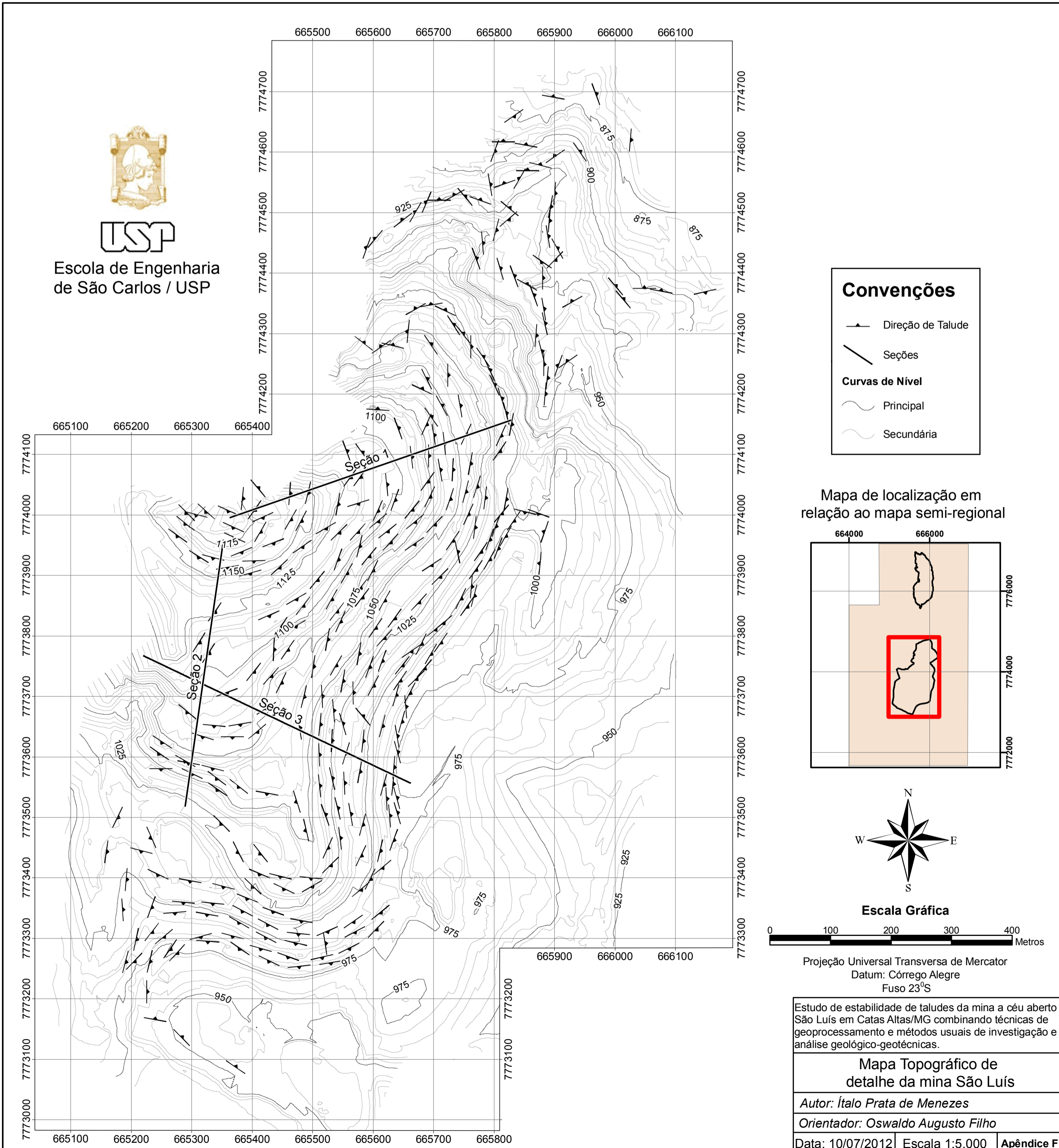
Autor: Ítalo Prata de Menezes  
Orientador: Oswaldo Augusto Filho  
Data: 10/07/2012 | Escala 1:10.000 | Apêndice E





**USP**

Escola de Engenharia  
de São Carlos / USP



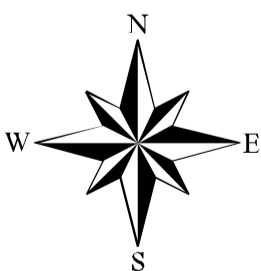
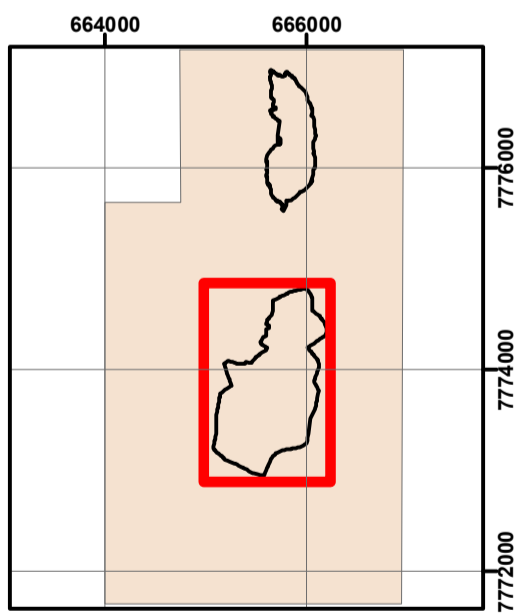
**Convenções**

- ▲— Direção de Talude
- Seções

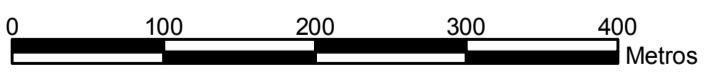
**Curvas de Nível**

- Principal
- Secundária

Mapa de localização em relação ao mapa semi-regional



**Escala Gráfica**



Projeção Universal Transversa de Mercator  
Datum: Córrego Alegre  
Fuso 23<sup>o</sup>S

Estudo de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas.

**Mapa Topográfico de detalhe da mina São Luís**

*Autor: Ítalo Prata de Menezes*

*Orientador: Oswaldo Augusto Filho*

Data: 10/07/2012 | Escala 1:5.000 | Apêndice F