



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO - GEOTÉCNICA E
PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO
MORRO DO CURRAL – CENTRO DE ARTES E
CONVENÇÕES DE OURO PRETO**

GILBERTO FERNANDES

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes

Ouro Preto
Maio/2000

**CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICA E PROPOSTAS
DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL – CENTRO
DE ARTES E CONVENÇÕES DE OURO PRETO**

AUTOR: GILBERTO FERNANDES

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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira

ORIENTADOR: Prof. Dr. Romero César Gomes

Ouro Preto, maio de 2000

Banca examinadora

Aos meus pais Zilda e Juvercínio (in memorian) e irmãos
pelo apoio e fé.
À minha esposa Cristina, aos meus filhos Daniel e Lucas,
pela compreensão e apoio.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a elaboração deste trabalho, e em particular:

Aos Professores e Orientadores Frederico Garcia Sobreira e Romero César Gomes, pelo acompanhamento, sugestões e apoio na organização e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Marco Antônio Fonseca, pela colaboração nos estudos de dados geológicos no campo e no escritório.

Ao Engenheiro Geólogo Cristiano Carvalho Lana, pelo auxílio na coleta de dados geológicos, no estudo de foto-interpretação e desenvolvimento do modelo estrutural.

Ao técnico de Laboratório Celso Amarante, pela parceria nos trabalhos de campo e realização dos ensaios.

Ao aluno de Engenharia Geológica Deiwys José Viana, pela colaboração na realização do ensaio petrográfico.

Ao Mestre em Geotecnia Cláudio Horta Rezende, pela colaboração na interpretação do software DISP 1,0.

Aos Professores do Programa de Mestrado, Christianne de L. Nogueira, Saulo G. S. Ribeiro, Terezinha J. Bonuccelli, Luís Gonzaga de Araújo e Waldyr L. O. Filho, pelas sugestões técnicas.

Ao Professor José Geraldo A .A . de Brito, pela colaboração na realização dos levantamentos de dados topográficos.

Aos Mestrandos Ana Paula, Sandra, José Cristiano, Sérgio e Carlos César pelo companheirismo e incentivo durante o trabalho.

Ao Engenheiro Civil Emerson Schneider, pela colaboração no uso do software Auto Cad 14.

À Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto e respectivos Laboratórios de Geotecnia e Laminação, pelo suporte técnico e formação profissional.

Ao Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto – CACOP, que permitiu a realização deste trabalho

RESUMO

O presente trabalho objetivou a determinação de parâmetros geomecânicos para subsidiar projeto conceitual de soluções de estabilização do maciço rochoso da encosta Morro do Curral – Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto, localizada na área urbana da cidade de Ouro Preto (MG).

Para alcançar esta meta, foram realizados levantamentos de campo para caracterização geológico-geotécnica do local. Realizou-se também ensaios geotécnicos de laboratório. Estes ensaios compreenderam ensaios de caracterização (solos e rochas) e de resistência das rochas, destacando-se os ensaios puntiforme e de cisalhamento direto.

O conhecimento das características intrínsecas do maciço rochoso, aliadas aos resultados dos ensaios de laboratório, permitiram a aplicação das classificações geomecânicas ao maciço, que foi subdividido em vinte setores.

Os índices geomecânicos obtidos destas classificações possibilitaram a obtenção de correlações com parâmetros do maciço rochoso de interesse à obra (deformabilidade e resistência).

Posteriormente, analisou-se a estabilidade e foram caracterizadas as rupturas dos diversos setores, através de análises cinemáticas convencionais e comparação entre os resultados obtidos e os processos de instabilização observados em campo.

Por fim, apresenta-se uma solução conceitual de obras de estabilização da encosta no maciço de xisto da Formação Sabará, visando a segurança da área e o baixo custo de implantação.

Palavras-chave: Encosta; movimentos gravitacionais de massa; classificações geomecânicas; análises cinemáticas; solução de estabilização.

ABSTRACT

The objective of the current work was to determine geomechanical parameters as a subsidy for a slope stability project on the Morro do Curral rock mass. The study took place in a convention center called CACOP, located in the urban area of Ouro Preto, MG.

Local surveys and geotechnical laboratory tests were developed to characterize geological–geotechnical characterization of the area. Better results were obtained through the point load and the direct shear tests were both used.

The understanding of the intrinsic characteristics of the rock mass associated with laboratory tests enabled the geomechanical classification, wich allowed not just the division of the rock mass into 20 sectors, but also brought up many interesting co-relations parameters (deformability and strenght).

Later, the stability and the type of ruptures of the whole sectors of rock mass were studied using the traditional kinematics analysis and the results and the local stage instability process.

Finally, there were proposed same stabilization methode in order to keep the stability of the slopes and to reduce the implementation costs.

Keywords: Slope; gravitational mass movements; geomechanical classifications; kinematics analysis; slope stabilization solution.

SUMÁRIO

Agradecimento	iv
Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice	vii
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Figuras	xiv
Lista de Abreviaturas e de Símbolos.....	xvi

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO1

1.1 Natureza do Trabalho	1
1.2. Estruturação do Trabalho	3

CAPÍTULO 2 – MOVIMENTOS DE MASSA E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS.....5

2.1. Movimentos Gravitacionais de Massas	5
2.1.1. Fatores Condicionantes.....	6
2.1.2. Classificações	6
2.1.2.1. Classificação de Varnes (1978).....	11
2.1.2.2 Classificação de Guidicini e Nieble (1983)	12
2.1.2.3. Classificação de Hutchinson (1988)	15
2.1.2.4 Classificação de Augusto Filho (1992).....	16
2.2. Caracterização Geológico-Geotécnica de Maciços Rochosos	18
2.2.1. Rocha Intacta.....	18
2.2.2. Descontinuidades.....	20
2.3. Classificações Geomecânicas de Maciços Rochosos	23
2.3.1. Classificação de Barton, Lien e Lunde (1974) – Sistema Q	24
2.3.2. Classificação de Bieniawski (1989) – Sistema RMR	26

2.3.3. Classificação de Romana (1985) – Sistema SMR.....	28
CAPÍTULO 3 – ENCOSTA MORRO DO CURRAL: CONDICIONANTES GERAIS	30
3.1. A Encosta do Morro Curral.....	30
3.2. Localização e Descrição da Área Estudada	32
3.3. Importância da Área	34
3.4. Origem e Histórico	36
3.5. Objetivos do Trabalho	38
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA	39
4.1. Coleta e Análise de dados Existentes	39
4.2. Trabalhos de Campo.....	40
4.2.1 Levantamento topográfico	40
4.2.2 Levantamento Geológico-estrutural	41
4.2.3 Levantamento Geológico-Geotécnico	41
4.2.4 Setorização e Caracterização do maciço.....	41
4.2.5 Amostragem (solos e rochas).....	43
4.3. Ensaio de Laboratório	43
4.3.1 Solos de cobertura	44
4.3.2 Rochas (Caracterização, análise petrográfica, cisalhamento direto, carga pontual).....	44
4.4. Análise de Resultados.....	46
4.4.1 Classificação Geomecânica	46
4.4.2 Análise Cinemática da Estabilidade	46
4.4.3 Identificação de Riscos Geológicos.....	48
4.4.4 Métodos Gerais de Estabilização	48

CAPÍTULO 5 – MODELO GEOMECÂNICO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL	50
5.1. Geomorfologia da Encosta.....	50
5.2. Geologia Local	53
5.3. Setorização da Encosta	57
5.3.1. Caracterização das Descontinuidades.....	58
5.3.2. Caracterização da Rocha Intacta	62
5.4. Agrupamento dos Setores	63
5.4.1. Agrupamento I Setores 1 a 6.....	64
5.4.2. Agrupamento II Setores 14 a 20.....	64
5.4.3. Agrupamento III Setores 7 a 13	65
5.5. Levantamento Geotécnico	66
5.6. Fotointerpretação.....	68
CAPÍTULO 6 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	70
6.1. Amostragem e preparação.....	70
6.2. Ensaio de Caracterização	72
6.3. Ensaio de Resistência à compressão Puntiforme.....	72
6.4. Ensaio de Cisalhamento Direto	76
6.5. Ensaio de Análise Petrográfica.....	81
6.6. Solos Superficiais	84
CAPÍTULO.7 – APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E PARÂMETROS DE PROJETO.....	86
7.1 Aplicação das Classificações Geomecânicas.....	86
7.11 Classificação de Bieniawski (1989) – Sistema RMR.....	86

7.1.2 Classificação de Romana (1985) – Sistema SMR.....	89
7.1.3 Classificação de Barton et al. (1974) – Sistema Q.....	92
7.1.4 Considerações sobre a aplicação das Classificações	94
7.1.5. Correlações para obtenção do Módulo de Deformabilidade.....	96
7.2. Parâmetros de Projeto	97
CAPÍTULO 8 –ANÁLISES CINEMÁTICAS E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE RUPTURA.....	99
8.1. Atitude das Superfícies de Descontinuidades	99
8.2. Setor 1	101
8.3. Setor 2.....	103
8.4. Setor 3	104
8.5. Setor 4.....	106
8.6. Setor 5	107
8.7. Setor 6.....	108
CAPÍTULO 9 – CONCEPÇÃO E PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL.....	112
9.1. Agrupamento I.....	113
9.2. Agrupamento II	116
9.3. Agrupamento III.....	117
CAPÍTULO.10 – CONCLUSÕES E AVALIAÇÃO GERAL DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL	121
10.1. Condicionantes Geológico-Geotécnicos da Encosta	121
10.2. Mecanismos de Instabilização da Encosta.....	123
10.3. Subsídios para as Obras de Estabilização da Encosta	123
10.4. Sugestões para Estudos Adicionais	124

BIBLIOGRÁFICAS REFERENCIADAS.....	125
BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADA	130
ANEXOS.....	133
Anexo 1 – Ficha de Campo.....	134
Anexo 2 – Mapa de Dados Topográficos da Encosta do Morro do Curral	137
Anexo 3 – Mapa Geológico da Encosta do Morro do Curral	138
Anexo 4 – Mapa Geotécnico da Encosta do Morro do Curral.....	139
Anexo 5 – Mapa dos Padrões Geomecânicos da Encosta do Morro do Curral ...	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978).....	12
Tabela 2.2. Classificação dos movimentos de massa (Guidicini e Nieble 1983).....	13
Tabela 2.3. Classificação dos movimentos de massas (Hutchinson 1988)	15
Tabela 2.4 Classificação dos movimentos de massa (Augusto Filho 1992)	17
Tabela 2.5.- Classificação de rochas quanto ao grau de alteração, segundo Guidicini & Nieble (1984), modificado	19
Tabela 2.6 Características de coerência das rochas intactas.....	19
Tabela 2.7 Classificação de campo da resistência dos materiais rochosos e correlação a resistência a compressão uniaxial, segundo Brown, (1981)	20
Tabela 2.8 Perfis de rugosidade e da ondulação das paredes das descontinuidades (ISMR,1983).....	22
Tabela 2.9. Sistema de classificações desenvolvidos para maciços rochosos e suas respectivas finalidades, modificado de Goodman (1976) apud Almeida (1994)	24
Tabela 2.10. Classes de maciços rochosos (Barton, Lien e Lunde,1974)	26
Tabela 2.11. Classificação geomecânica de Bieniawski (1989).....	27
Tabela 2.12 Classe de Estabilidade segundo o SMR (Romana, 1985)	29
Tabela 4.1. Tipos de métodos de estabilização de taludes e encostas (Carvalho, 1991)	49
Tabela 5.1. Geometria dos setores do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral	58
Tabela 5.2. Caracterização das descontinuidades por setores do maciço rochoso.....	61
Tabela 5.3. Resistência à compressão uniaxial, coerência e grau de alteração por setor	63
Tabela 5.4. Caracterização geotécnica por agrupamento	68
Tabela 6.1. Valores dos índices das litologias da encosta do Morro do Curral.....	72

Tabela 6.2 Resultados dos ensaios de resistência à compressão puntiforme executados nos xistos da encosta do Morro do Curral	75
Tabela 6.3 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na direção paralela à foliação	79
Tabela 6.4 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na direção perpendicular à foliação	81
Tabela 6.5 Caracterização do solo de cobertura da encosta do Morro do Curral	85
Tabela 7.1. Ponderação dos parâmetros do sistema RMR de Bieniawski (1989) para a encosta estudada	88
Tabela 7.2. Classificação do maciço pela da aplicação do sistema RMR de Bieniawski (1989)	89
Tabela 7.3. Valores dos Parâmetros do Sistema SMR de Romana (1985)	91
Tabela 7.4. Classificação do maciço pelo sistema SMR de Romana (1985)	92
Tabela 7.5. Parâmetros do Sistema Q de Barton et al. (1974)	93
Tabela 7.6. Classificação do maciço pelo sistema Q de Barton et al. (1974)	94
Tabela 7.7 Comparação entre os resultados da aplicação dos sistemas de classificação geomecânica	95
Tabela 7.8 Módulos de Deformabilidade da rocha por setor geomecânico do maciço analisado	97
Tabela 7.9. Parâmetros Geomecânicos do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral	98
Tabela 9.1. Quantidade e características dimensionais dos gabiões	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa histórico do povoamento de Ouro Preto. Vasconcelos (1977)	1
Figura 2.1. Formas de rupturas dos taludes (Guidicini e Nieble, 1983).....	14
Figura 3.1. Cicatrizes de instabilidades identificadas na encosta Morro do Curral.....	31
Figura 3.2. Localização da Encosta Morro do Curral no eixo histórico da cidade Ouro Preto.....	33
Figura 3.3. Localização no espaço urbano de Ouro Preto da área em que se encontra a Encosta Morro do Curral	34
Figura 3.4. Posição do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto no núcleo histórico do município.....	36
Figura 4.1. Teste de Markland – para análise cinemática de rupturas, considerando o ângulo de atrito	47
Figura 5.1. Escarpas da Encosta do Morro do Curral	50
Figura 5.2. Vertentes da Encosta do Morro do Curral	51
Figura 5.3. Vista geral da encosta Morro do curral.....	52
Figura 5.4. Vista parcial da calha de drenagem da encosta do Morro do Curral.....	52
Figura 5.5. Representação do bloco-diagrama do modelo estrutural.....	54
Figura 5.6. Vista da dobra estrutural	54
Figura 5.7. Influência da zona de falha na encosta do Morro do Curral	55
Figura 5.8. Escorregamento, condicionado pelo sistema de descontinuidades da encosta.....	56
Figura 5.9. Setor geotécnico 5, principal descontinuidade família de foliação (F1)	59
Figura 5.10. Vista das famílias de fraturas (F2 e F3)	60
Figura 5.11. Detalhe das famílias de fraturas horizontais no setor 8	60
Figura 5.12. Zona geotécnica do agrupamento I setores 1 a 6.....	64
Figura 5.13. Zona geotécnica do agrupamento II setores 14 a 20	65
Figura 5.14. Zona geotécnica do agrupamento III setores 7 a 13	66

Figura 6.1. Amostras representativa da encosta do Morro do Curral	70
Figura 6.2. Corpo de prova do xisto para realização dos ensaios de compressão puntiforme.....	71
Figura 6.3. Esquema geral do ensaio de compressão puntiforme. (Hoek & Bray, 1981)	73
Figura 6.4. Aparelho portátil usado no ensaio de compressão puntiforme	74
Figura 6.5. Arranjon conjunto portátil para ensaio de cisalhamento direto em materiais rochosos	76
Figura 6.6. Corpo de prova para ensaios de Cisalhamento Direto.....	77
Figura 6.7. Prensa de Cisalhamento Direto usada na execução dos ensaios	78
Figura 6.8. Tipos de ruptura observados nos corpos de prova	80
Figura 6.9. Lâmina petrográfica do xisto cinza	83
Figura 6.10. Lâmina petrográfica do xisto marrom a avermelhado.....	84
Figura 8.1. Diagrama de frequência correspondente às superfícies de famílias de descontinuidades (F1) do agrupamento I (setores 1 a 6).....	100
Figura 8.2. Diagrama de frequência correspondente às superfícies de famílias de descontinuidades (F2, F3 e F4) do agrupamento I (setores 1 a 6)	100
Figura 8.3. Teste de Markland, para a escarpas E1 e E2; vertente V1 do setor 1	102
Figura 8.4. Teste de Markland, para a escarpas E2 e a vertente V1 do setor 2 ...	103
Figura 8.5. Teste de Markland, para a escarpa E3 e a vertente V2 do setor 3.....	105
Figura 8.6. Teste de Markland, para a escarpa E4 e a vertente V2 do setor 4.....	106
Figura 8.7. Teste de Markland, para a escarpa E5 e a vertente V3 do setor 5.....	108
Figura 8.8. Teste de Markland, para a escarpas E6 e E7; vertente V4 do setor 6	109
Figura 8.9. Ruptura planar em vertentes de xisto no agrupamento I	110
Figura 8.10. Ruptura em cunha em escarpas de xisto no agrupamento I.....	111
Figura 8.11. Tombamento de blocos em taludes de xisto no agrupamento I	111
Figura 9.1. Planta da proposta de estabilização da encosta do Morro do Curral.....	119
Figura 9.2. Seção transversal da proposta de estabilização da encosta do Morro do Curral	120

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SÍMBOLOS

ISRM: International Society of Rocks Mechanics

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM: American Society for Testing and Materials

IAEG: International Association for Engineering Geology and the Environment

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Q: Nota geral do maciço no sistema de Barton et al (1974)

RMR: Rock Mass Rating

SMR: Slope Mass Rating

RQD: Rock Quality Designation

SRF: Stress Reduction Factor

ϕ : ângulo de atrito

c: Intercepto de coesão

N: força normal

T: força cisalhante

J_n: Fator do sistema *Q*, referente ao número de famílias de descontinuidades

J_r: Fator do sistema *Q*, referente à rugosidade das paredes de descontinuidades

J_a: Fator do sistema *Q*, referente ao grau de alteração e ao preenchimento das descontinuidades

J_w: Fator do sistema *Q*, referente à influência da água subterrânea

E: Módulo de deformabilidade

F₁, *F₂*, *F₃*, e *F₄*: Fatores de ajuste do *SMR*

Ψ_i : Mergulho da linha de interseção das descontinuidades

Ψ_f : Mergulho da face da vertente

F1 a F5: Famílias de descontinuidades

S1 a S20: Setores geotécnicos individualizados no maciço rochoso

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. NATUREZA DO TRABALHO

A cidade de Ouro Preto está sofrendo atualmente as conseqüências do uso inadequado da ocupação do solo urbano e rural, em função do povoamento excessivo, da falta de áreas de expansão e da concentração da população de baixa renda em torno dos rios, córregos e zonas da periferia do núcleo urbano. Desde o início de seu povoamento, a ocupação buscou incorporar os poucos espaços planos existentes entre seus córregos e montanhas, criando núcleos populacionais em duas direções preferenciais. (Figura 1.1).

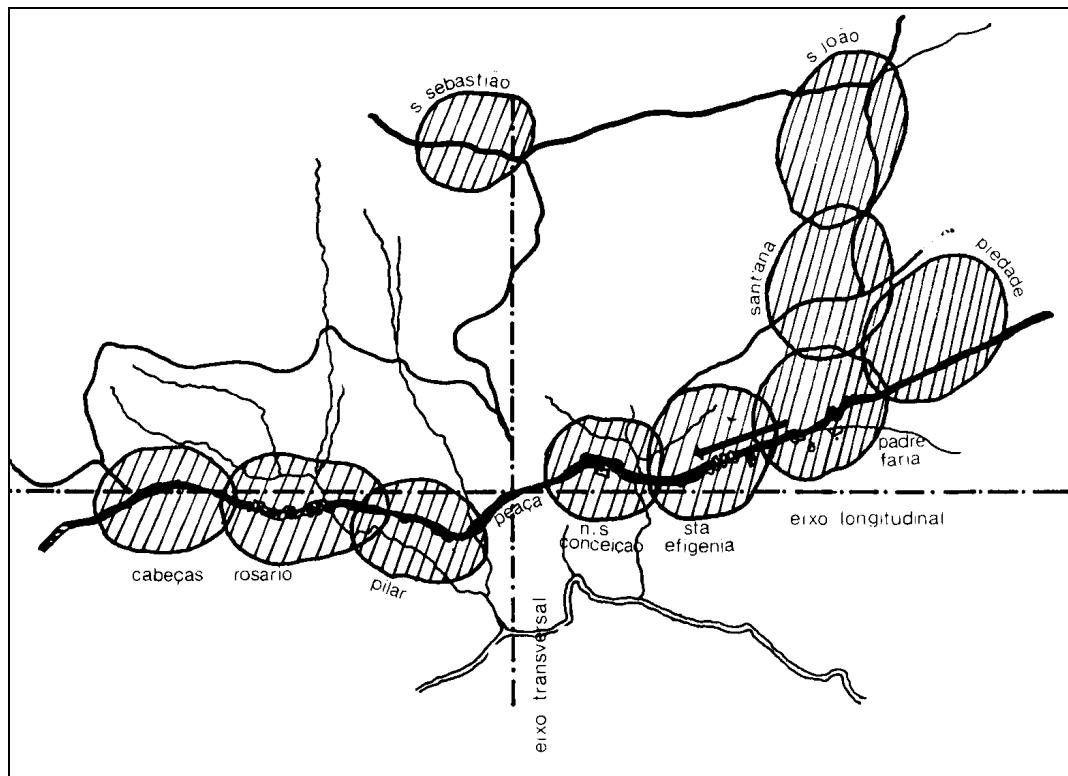


Figura 1.1. Mapa histórico do povoamento de Ouro Preto (Vasconcelos, 1977).

A influência da morfologia dos terrenos e das mineralizações do ouro na orientação da ocupação na cidade é evidente, conforme se pode comprovar pelas correntes de assentamento que foram desenvolvidas em dois eixos, seguindo os cursos de água e a ocorrência do ouro (aluvião e primário). Esta diretriz sempre esteve presente desde os estudos de urbanização da Praia do Funil, hoje complexo formado pela praças Barão do Rio Branco e Cesário Alvim, no início do século XIX, quando da transferência da capital para Belo Horizonte.

Atualmente, a cidade carece do uso do conhecimento das propriedades e das características dos seus terrenos de forma a se desenvolver harmonicamente, viabilizando um crescimento ordenado num espaço físico geotecnicaamente inadequado. Estes riscos estão ligados à susceptibilidade natural das encostas a movimentos de massa, associados a uma ocupação desordenada e outros fatores tais como baixo poder aquisitivo da população e ausência de melhores tecnologias na forma como a construção civil é realizada de maneira geral.

As transformações sofridas pela cidade, em face dos assentamentos urbanos crescentes, interferiram de maneira acelerada e intensa na estabilidade das encostas. Particularmente na área estudada, estes efeitos são patentes ao se analisar a evolução local pelo conjunto de fotos aéreas ao longo de várias décadas, atestando a degradação imposta pela ocupação desordenada.

O presente trabalho investiga os condicionantes gerais da encosta do Morro do Curral, abordando a sua ocupação, a geologia local, sua caracterização geológico-geotécnica, a classificação geomecânica do maciço, a identificação dos mecanismos potenciais de ruptura e o conhecimento dos processos de movimentos gravitacionais de massa. Estes processos podem afetar substancialmente a estabilidade das encostas e interferir na segurança das construções e empreendimentos civis. Adicionalmente, procurou-se obter os parâmetros de projeto de engenharia e estabelecer um modelo geológico-geotécnico para a encosta estudada, de forma a se obter soluções e projetos consistentes com os mecanismos de instabilização detectados.

No entanto, tão importante quanto a solução dos problemas existentes, é a adoção de medidas preventivas, de modo a se evitar a repetição de acidentes geotécnicos de gravidade, cujo potencial foi previamente abordado já na Carta Geotécnica de Ouro Preto (Carvalho, 1982). Ouro Preto possui várias outras encostas

em condições similares de risco geotécnico e, neste sentido, a ausência de ações efetivas e preventivas dos órgãos municipais, estaduais e federais em termos do planejamento e da ocupação territorial, conjugados num plano diretor, compromete drasticamente quaisquer políticas de expansão da cidade, no âmbito do seu espaço urbano atual.

1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em dez capítulos e cinco anexos, onde se incluem as fichas de campo, mapa de dados topográficos, mapa geológico, mapa geotécnico e mapa dos padrões geomecânicos relativos à compartimentação do maciço.

No Capítulo 1 – “Introdução”, são expostos os condicionantes gerais do relevo da cidade de Ouro Preto, bem como a natureza e os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 – “Movimentos de Massa e Caracterização Geomecânica de Maciços Rochosos”, são abordados os conceitos clássicos dos movimentos gravitacionais de massa, da Mecânica das Rochas e dos sistemas de classificações geomecânicas aplicados a maciços rochosos.

O Capítulo 3 – “Encosta do Morro do Curral: Condicionantes Gerais” descreve a situação atual e a localização da encosta, bem como a sua influência estratégica na implantação do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. O objetivo deste capítulo é mostrar a importância da área no contexto geral do projeto.

O Capítulo 4 – “Metodologia” descreve a metodologia de investigação utilizada, comportando as fases de coleta e análise dos dados existentes, levantamentos de campo, ensaios de laboratório e os procedimentos adotados para a análise global dos resultados.

O Capítulo 5 – “Modelo Geomecânico da Encosta do Morro do Curral” compreende os levantamentos de campo e a implementação de uma base topográfica para subsidiar a elaboração dos mapas de dados, bem como a investigação geológico-geotécnica para formalização do modelo geomecânico global dos xistos da encosta.

No Capítulo 6 – “Ensaaios de Laboratório”, são apresentados os resultados dos ensaios para caracterização física e comportamento mecânico dos xistos. Para a caracterização mecânica, foram executados ensaios de compressão puntiforme com determinação do índice de anisotropia. Foram realizados, também, ensaios de

cisalhamento direto em amostras das litologias da encosta, nas direções do plano de foliação e na direção perpendicular ao mesmo.

No Capítulo 7 – “Aplicação dos Sistemas de Classificação Geomecânica e Parâmetros de Projeto“, foram aplicados os sistemas de classificação geomecânica RMR, SMR e Q aos xistos da encosta, baseados nos dados previamente obtidos, a partir dos levantamentos de campo e dos ensaios em laboratório. Procedeu-se, adicionalmente, à avaliação da qualidade do maciço rochoso, com a estimativa dos parâmetros de projeto para as obras de estabilização da encosta.

O Capítulo 8 – “Análises Cinemáticas e Caracterização dos Mecanismos de Ruptura” trata das análises cinemáticas e da caracterização dos mecanismos potenciais de ruptura ao longo da encosta estudada, com as descrições individualizadas por setor do maciço.

O Capítulo 9 – “Concepção e Propostas de Estabilização da Encosta do Morro do Curral” discute e apresenta alternativas de projetos geotécnicos para uma solução abrangente e integrada dos problemas geológico-geotécnicos detectados na encosta do Morro do Curral.

No Capítulo 10 – “Conclusões e Avaliação Geral da Encosta do Morro do Curral”, são ressaltados os aspectos essenciais dos estudos realizados e das análises implementadas, incluindo-se ainda algumas sugestões para eventuais trabalhos futuros na própria encosta ou no contexto estratigráfico da cidade de Ouro Preto.

CAPÍTULO 2

MOVIMENTOS DE MASSA E CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.1. MOVIMENTOS GRAVITACIONAIS DE MASSAS

De modo geral, os movimentos de massa (solos e rochas), em zonas urbanas, têm sido objeto de vários estudos em diversos países (Guidicini e Nieble, 1984), devido aos numerosos problemas que quase sempre resultam em danos materiais significativos e vítimas fatais. De acordo com Carvalho (1997), a classificação dos eventos instabilizadores em maciços naturais é meta antiga dos engenheiros geotécnicos e, por isso, há um notável acervo de informações na literatura nacional e internacional.

Os movimentos de massa em áreas urbanas no Brasil ocorreram em várias cidades, com vítimas fatais e danos materiais da ordem de milhões de dólares, podendo-se citar, como os mais importantes acidentes ocorridos no Brasil, os seguintes: Santos / SP, em 1928, com 60 mortes e destruição da Santa Casa de Santos; Santos / SP, em 1956, com 43 mortes e destruição de 100 casas; Rio de Janeiro / RJ, em 1966, com 100 mortes; Serra das Araras, em 1967, com 1200 mortes e destruição de dezenas de casas; Caraguatatuba / SP, em 1967, com 120 mortes e destruição de 400 casas; Salvador / BA, em 1971, com 104 mortes e destruição de 60 moradias; Petrópolis / RJ, em 1988, com 171 mortes e interdição de 1100 moradias; Contagem / MG, em 1992, com 36 mortes e Ouro Preto / MG, em 1997, com 12 mortes.

No contexto da área urbana de Ouro Preto, o acidente mais grave ocorrido na cidade de Ouro Preto ocorreu no Bairro da Piedade. Na noite de 4 de janeiro de 1997, em consequência das fortes chuvas que atingiram a cidade, ocorreu um movimento catastrófico envolvendo um volume aproximado de 800 m^3 de material que atingiu duas residências matando 12 pessoas (Fonseca e Sobreira, 1997).

O movimento ocorrido foi do tipo complexo e imprimiu uma cicatriz de aproximadamente 28 metros de extensão na encosta. O volume de material era

constituído por blocos de itabirito friável, blocos de canga e material inconsolidado que se deslocaram atingindo as duas residências.

Este é um caso que exemplifica bem o descuido das autoridades com a ocupação inadequada das encostas na cidade de Ouro Preto. Existem diversos trabalhos de cartografia geotécnica realizados desde a década de 80 na cidade e, mesmo assim, ainda ocorrem tragédias como esta, principalmente no período das chuvas. Dentre os trabalhos pode-se citar Carvalho (1982), Sobreira (1990), Sobreira et al. (1990), Souza (1996), Souza e Zuquette (1997) e, principalmente, Bonuccelli (1999).

2.1.1. Fatores Condicionantes

De modo geral, segundo Varnes (1978), os movimentos de massa são deflagrados por uma cadeia de eventos, que tendem a aumentar as solicitações ou diminuir a resistência dos maciços.

Segundo Guidicini e Nieble (1976), os condicionantes estão divididos em agentes e causas de instabilizações. De acordo com estes autores, os agentes deflagradores são separados em predisponentes e efetivos e as causas em internas, intermediárias e externas. Os agentes predisponentes são representados pelas condições geológicas, geométricas e ambientais. Os agentes efetivos são os elementos diretamente responsáveis pelo início das instabilizações da encosta, incluindo a ação do homem.

As causas ou fatores influentes nos movimentos de massa devem ser bem entendidos, para que acontecimentos similares possam ser previstos, controlados e evitados, uma vez que ocorrem sob a influência de fatores geológicos, topográficos e climáticos específicos que se repetem em várias regiões do planeta.

2.1.2. Classificações

Existem inúmeros sistemas de classificações que, de maneira geral, buscam correlacionar cada tipo de movimento da encosta a um grupo de características, tais como: natureza do material, velocidade e direção do movimento, profundidade e raio de

alcance, ambiente geomorfológico e climático, superfície de ruptura, estado de tensões “in situ” e potencial destrutivo. Entre os autores que propuseram classificações de movimentos de massas, podem-se citar Sharpe (1938), Terzaghi (1950), Varnes (1958, 1978) Magalhães Freire (1965), Skempton e Hutchinson (1969), Guidicini e Nieble (1976), Hutchinson (1988), Augusto Filho (1992), Turner e Schuster (1996), entre outros.

Em termos gerais os movimentos de massa podem ser classificados em quedas (“falls”), tombamentos (“topples”), escorregamentos (“slides”), que podem ser translacionais ou rotacionais, espalhamentos (“spreads”), escoamentos (“flows”) e movimentos complexos.

a) Quedas

Forma-se de uma massa de material de qualquer tamanho que se aparta de um talude com forte inclinação ou escarpa, caindo encosta abaixo através de queda livre, saltos ou rolamentos do material, sem ocorrência de deslocamentos cisalhantes. A movimentação é muito a extremamente rápida. Pode ou não haver pequenos movimentos anteriores à separação do material de origem.

Quanto ao material envolvido, pode ocorrer queda de blocos rochosos (“rock falls”), queda de detritos ou solos grosseiros (“debris falls”), queda de solos finos (“earth falls”).

Hutchinson (1988) separa as quedas em primárias ou secundárias; primárias quando ocorre o destacamento de solos, detritos e rochas do material de origem; secundárias quando ocorrem quedas de matacões e massas já destacadas e depositadas nas encostas.

De acordo com Augusto filho (1992), as formas geométricas são variáveis, podem ocorrer em blocos, placas e lascas.

b) Tombamentos

Distingue-se pela rotação (para frente, ou para fora da encosta) de uma unidade ou unidades em torno de um ponto situado abaixo do centro de gravidade das mesmas, por

meio da ação da gravidade, ou por meio de forças aplicadas pelas unidades adjacentes, ou ainda por fluidos presentes nas descontinuidades.

Pode culminar ou não com a queda ou deslizamento, dependendo da geometria e orientação do talude e das descontinuidades. Ocorre em vários tipos de rochas, solos grossos (“debris” ou detritos) ou finos, podendo movimentar desde algumas centenas até a milhares de metros cúbicos de material.

Hutchinson (1988) explica que os tombamentos podem estar condicionados por descontinuidades preexistentes, ou podem ocorrer devido à liberação de blocos fraturados por tensões de tração que aparecem no material anteriormente intacto.

Segundo Augusto Filho (1992), os tombamentos ocorrem nos blocos rochosos, condicionados pela presença das descontinuidades no maciço rochoso, com grande mergulho.

c) Escorregamentos

Segundo Guidicini e Nieble (1983) o escorregamento se caracteriza pelo movimento rápido de massas de solo ou rocha, geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude (natural, de corte ou aterro).

De acordo com Varnes (1978), a movimentação ocorre através de deformações e rupturas cisalhantes, ao longo de uma ou várias superfícies facilmente observáveis (ou que podem ser inferidas), ou ainda dentro de uma zona (estreita) que pode ser bem definida.

Augusto Filho (1992) explica que o mecanismo de ruptura envolvido nestes processos ocorre por aumento das tensões atuantes ou queda da resistência, em períodos relativamente curtos, ou combinações destes mecanismos, que levam os terrenos, que constituem os taludes e encostas naturais, a rupturas por cisalhamento.

Diferentes tipos de escorregamentos podem ser identificados em função de sua geometria e da natureza do material que instabilizam. São subdivididos em dois tipos: translacionais e rotacionais.

c.1) Escorregamentos translacionais

A ruptura é por cisalhamento e a massa se desloca sobre uma superfície relativamente plana e são condicionados por superfícies de fraqueza, desfavoráveis à estabilidade, originadas de descontinuidades: fraturas, falhas, acamamento, foliações, xistosidades.

No escorregamento translacional o reequilíbrio só acontece quando as forças atuantes diminuem relativamente às resistentes (Bonuccelli, 1999).

Nessa categoria se enquadram os escorregamentos planares (em forma de blocos, placas) e os escorregamentos em cunha (deslizamento ao longo da interseção de duas descontinuidades) que ocorrem em rochas. Hutchinson (1988) cita ainda o caso de escorregamentos em rochas com superfícies escalonadas (degraus).

c.2) Escorregamentos rotacionais

De acordo com Varnes (1978) são pequenos deslizamentos ao longo de uma superfície de ruptura circular com concavidade voltada para cima.

Em vários casos, a superfície de ruptura exposta (escarpa) e a superfície de ruptura não exposta, formam uma espécie de concha.

Segundo Augusto Filho (1992) os escorregamentos rotacionais possuem superfícies de deslizamentos curvas, sendo comum a ocorrência de uma série de rupturas combinadas e sucessivas.

Guidicini e Nieble (1983) explicam que no escorregamento rotacional o colapso da massa ocorre por ruptura ao longo da superfície de escorregamento (via de regra, um arco de circunferência) e rotação em torno do centro do arco. A força responsável pelo colapso é, em princípio, o peso da cunha, enquanto a força resistente é, em princípio, a resistência ao cisalhamento ao longo do círculo de ruptura.

Hutchinson (1988) afirma que esse tipo de escorregamento ocorre quando a poro-pressão no material é suficientemente alta para provocar uma ruptura rotacional profunda, ao invés de uma ruptura translacional mais rasa, e classifica este tipo de movimento como escorregamento composto.

Escorregamentos rotacionais puros ocorrem em materiais homogêneos: em barragens de terra, aterros em geral, em pequenas escavações de materiais naturais. Entretanto os materiais naturais freqüentemente não são homogêneos, e portanto, apresentam deslizamentos com formas mais complexas que a forma circular.

d) Espalhamentos

Essa forma de movimento se caracteriza pela ruptura e espalhamento (ou dilatação ou expansão) lateral de materiais coerentes (solos e rochas) que se encontram sobrejacentes a materiais que sofreram perda de resistência e ruptura repentina (colapso), por exemplo por liquefação; o resultado é uma baixíssima resistência, ainda que temporária, da superfície de contato dos materiais. O material sobrejacente pode sofrer rotação, translação, escoamento, desintegração e subsidência. Argilas e siltes sensíveis, submetidas a vibrações; terremotos; liquefação de camadas arenosas, podem provocar o fraturamento e espalhamento do material suprajacente.

e) Escoamentos

Esses processos, numa definição ampla, são representados por deformações, ou movimentos contínuos, estando ou não presente uma superfície definida ao longo da qual a movimentação ocorre. O conceito de escoamento não está associado ao fator velocidade, englobando movimentos lentos (rastejos), movimento rápidos (corridas), ou extremamente rápidos.

É encontrado com maior freqüência em materiais inconsolidados com diferentes teores de umidade: materiais totalmente secos, materiais saturados, materiais com umidade próxima ao limite de liquidez.

Há escoamento em materiais rochosos; em detritos ou solos grossos e solos finos.

e.1) Escoamento no substrato rochoso

O movimento é extremamente lento e é encontrado em regiões de relevo íngreme. Segundo Bonuccelli (1999) esse tipo de movimento resulta em dobramentos,

arqueamentos e formação de saliências ou outras manifestações de comportamento plástico.

- e.2) Escoamento em detritos ou solos grossos e solos finos (materiais inconsolidados).

São movimentos mais facilmente identificados do que aqueles que ocorrem em rochas, porque os deslocamentos relativos na massa de solo são maiores, e sua aparência se assemelha a um fluxo de fluidos. A superfície de deslizamento não é visível, pois os limites entre a massa de material que se move e o material que permanece é apenas uma estreita superfície de movimentos diferenciais.

Segundo Bonuccelli (1999) a diferenciação entre escorregamentos e escoamentos, não é simples, pois há uma mudança gradativa de um tipo para o outro.

f) Movimentos de massa complexos

Nesta categoria estão incluídos combinações de diferentes tipos de movimentos, sendo mais comuns do que qualquer tipo de movimento individual, sendo mais encontradas, as combinações: queda e rolamento de blocos associados a escoamentos de materiais grosseiros (detritos); escorregamentos e escoamentos de solos e detritos.

Dentre os diversos sistemas que buscam correlacionar os diferentes tipos de movimentos de massa, destacamos os propostos por Varnes (1978), Guidicini e Nieble (1983), Hutchinson (1988) e Augusto Filho (1992)

2.1.2.1. Classificação de Varnes (1978)

A classificação proposta por Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente, sendo a adotada oficialmente pela IAEG (International Association for Engineering Geology and the Environment).

Tabela 2.1 Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978).

tipo de movimento			tipo de material		
			rocha	Solo (engenharia)	
Quedas			de rochas	de detritos	de solos
Tombamentos			de rochas	de detritos	de solos
Escorregamentos	rotacional	Poucas unidades	deslizamento de rochas	deslizamento de detritos	Deslizamento de solos
	translacional	Poucas unidades	de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de solos
		Muitas unidades	de rochas	de detritos	de solos
		Espalhamentos laterais			de rochas
escoamentos			de rocha (rastejo profundo)	de detritos (rastejo de solo)	de solos (rastejo de solo)
Complexos: combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos					

Os escorregamentos são movimentos ao longo da encosta e podem ocorrer através das deformações cisalhantes e do deslocamentos ao longo de uma ou várias superfícies. Os escorregamentos são divididos em dois tipos: rotacionais e translacionais. No rotacional, o material não é muito deformado e é composto de uma ou poucas unidades, as fissuras que aparecem nas pequenas deformações são concêntricas e côncavas na direção do movimento.

Os escorregamentos translacionais ocorrem quando a massa se movimenta sobre uma superfície mais ou menos plana, apresentando um pequeno movimento rotacional. Os movimentos são geralmente condicionados por superfícies de fraqueza originadas de discontinuidades (fraturas, falhas e foliações) ou do contato entre o substrato rochoso e o material sobrejacente.

2.1.2.2. Classificação de Guidicini e Nieble (1983)

Os autores classificam os movimentos de massa em três tipos fundamentais: escoamentos, escorregamentos e subsidências e subdividiram estes três tipos em sete subtipos, que foram cadastrados em classes devidamente caracterizadas em termos de inclinação do talude, tipo e velocidade do movimento.

Tabela 2.2. Classificação dos movimentos de massa (Guidicini e Nieble 1983).

Tipo fundamental	Sub-tipo	Classes principais	Inclinação de talude	Tipo e velocidade
1. Escoamentos	Rastejo, reptação	- Rastejo de detritos de tálus - Rastejo de rocha	Suave, mesmo próximo de 0°	Superfícies múltiplas Translação Velocidade baixa (3 a 5 cm/ano)
	Corridas	Corrida de areia ou silte	Variável	Superfície pré – existente Translação Velocidade alta
2. Escorregamentos	Escorregamentos rotacionais	Escorregamento de taludes	De regular a forte	Superfície circular Rotação e translação Velocidade alta (0 a 30 cm/h)
	Escorregamentos translacionais	- Escorregamento translacional de rocha - Queda de rocha - Queda de detritos	De regular a forte	
3. Subsidiências	Subsidiências	Por carreamento de grãos	Aproximadamente nula	Superfícies múltiplas e variáveis Velocidades variáveis, Translação vertical
	Recalques	Por consolidação	Aproximadamente nula	
	Desabamentos	Por rotura de camada	Aproximadamente nula	
4.	Formas de transição		Variável	Complexos ou múltiplas
5.	Movimentos de massa complexos		Variável	

Segundo Guidicini & Nieble (1983), a ruptura de um talude em rocha pode ocorrer de muitas formas (Figura 2.1) e, na maioria dos casos, é dominada pela presença de descontinuidades preexistentes.

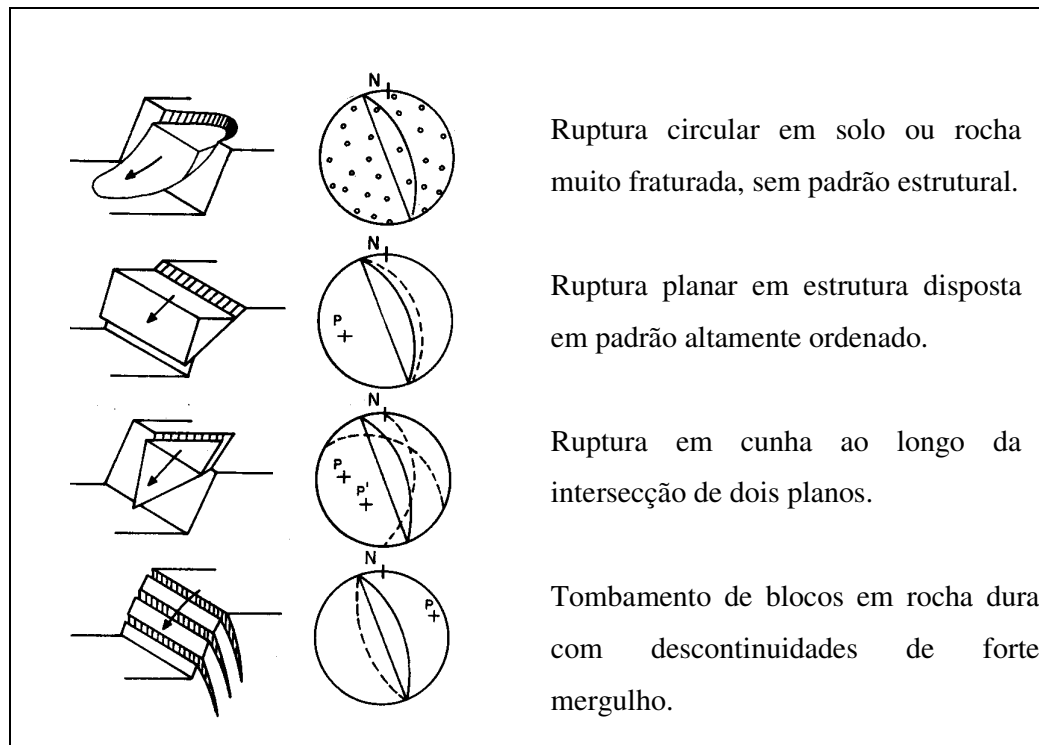


Figura 2.1. Formas de rupturas dos taludes (Guidicini e Nieble, 1983).

A ruptura circular ocorre em maciços rochosos extremamente fraturados, em solos ou em maciços rochosos muito alterados, segundo uma superfície semelhante a uma calota de esfera ou ainda segundo alguma feição estrutural.

A ruptura planar acontece segundo juntas predominantes e/ou contínuas, cuja direção é paralela (ou aproximadamente paralela) à face do talude. Tem-se por condições de instabilidade:

1. As juntas devem possuir inclinação menor que a inclinação da face do talude, na direção de deslizamento (se o mergulho for maior, as mesmas não aflorarão, e dificilmente ocorrerá a ruptura).
2. A resistência ao cisalhamento do plano de ruptura não deve ser suficiente a ponto de assegurar a estabilidade.
3. A existência de superfícies laterais de alívio, que permitam o deslizamento.

A ruptura em cunha é gerada a partir de duas descontinuidades distintas, cuja interseção propicia o rompimento de parte do talude. As condições e orientações das diferentes famílias de descontinuidades determinam o evento.

A ruptura por tombamento ocorre segundo famílias de descontinuidades predominantes e/ou contínuas, com mergulho vertical ou subvertical, cuja direção é quase paralela à face do talude.

Na prática, identifica-se dois tipos de tombamentos:

1. Tombamentos menores, que afetam uma espessura reduzida de talude.
2. Tombamentos profundos, que produzem grandes deformações, e que podem ser confundidos com rupturas planas.

Nos dois tipos de tombamentos, o processo acontece de maneira lenta e não como um colapso instantâneo.

2.1.2.3. Classificação de Hutchinson (1988)

O autor evidencia a morfologia dos movimentos de taludes e considera os mecanismos, os materiais e a proporção dos movimentos.

Tabela 2.3. Classificação dos movimentos de massas (Hutchinson 1988).

tipos	subtipos
recuo (“rebound”)	Escavações artificiais vales naturalmente erodidos
rastejo(“creep”)	Superfície sazonal e do manto contínuo, profundamente assentado e de massa pré-ruptura e progressivo pós-ruptura
fraturamento nos taludes de montanhas (“sagging of mountain slopes”)	unilateral bilateral tombamento
escorregamentos (“landslides”)	Fraturas confinadas rotacionais compostos translacionais
escoamentos (“flow like form”)	“mudslides”, “flow slides”, “debris flows”, “sturzstroms”
tombamentos (“topples”)	Simples e múltiplos
quedas (“falls”)	primárias secundárias
movimentos complexos de taludes (“complex slope movements”)	

Segundo o autor, os escorregamentos (landslides) são movimentos de solos e rochas rápidos que ocorrem em uma ou mais superfícies de deslizamentos limitadas e distintas. Neste tipo de movimento, é possível o desenvolvimento de fraturas confinadas, escorregamentos rotacionais (geralmente presentes em taludes que consistem em um depósito de material grosseiro), escorregamentos compostos (ocorrem entre rupturas translacionais e rotacionais) e escorregamentos translacionais (ocorrem basicamente em rupturas por cisalhamento).

2.1.2.4. Classificação de Augusto Filho (1992)

É descrito o tipo de processo dos movimentos de massa, com as principais características do material e geometria da encosta.

Tabela 2.4 Classificação dos movimentos de massa (Augusto Filho 1992).

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

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

Um maciço rochoso é um conjunto de blocos de rocha, justapostos e articulados. O material que forma os blocos é a rocha intacta, e as superfícies que os limitam, as descontinuidades. É um meio descontínuo, heterogêneo, anisotrópico, constituído pelas rochas e as descontinuidades que o compartimentam.

As características físicas condicionam a qualidade dos maciços rochosos e estão ligadas principalmente à litologia, ao estado de alteração, à coerência e principalmente, às descontinuidades e suas propriedades. Compreendem as feições geológicas intrínsecas, tais como: mineralogia, textura, estrutura e os parâmetros de resistência, deformabilidade, permeabilidade e estado de tensões naturais. Elas são determinadas por investigações de campo e ensaios “in situ” e laboratoriais que são padronizados pela ISRM(1983).

A avaliação do comportamento geomecânico dos maciços rochosos têm sido objeto de diversos estudos, desde concepções empíricas dos problemas até formulações analíticas apoiadas em previsões quantitativas. A caracterização geomecânica é fundamental na busca de informações acerca dos atributos do maciço rochoso que ditam o seu comportamento, uma vez que eles mudam de local para local em função da história geológica. Estes estudos de caracterização geomecânica resultaram em vários sistemas de classificação (Terzaghi, 1946; Rabcewicz, 1957; Lauffer, 1958; Deere, 1964; Ikeda, 1970; Wickham, 1972; Bieniawski, 1974 e 1989; Barton et al., 1974; Rocha, 1976; Romana, 1985; etc.).

2.2.1. Rocha Intacta

A rocha intacta pode ser sã ou alterada; sendo classificada como sã, quando não apresentar nenhum sinal de alteração, possuir alta resistência ao impacto com o martelo e ser isenta de descontinuidades.

A qualidade das rochas está ligada essencialmente à sua gênese, à litologia, ao estado de alteração e à coerência, de acordo com os seguintes aspectos:

- Gênese: rochas ígneas ou magmáticas, sedimentares e metamórficas;
- Litologia: tipos de rocha de acordo com conceitos da petrografia;
- Alteração: é a perda das características geomecânicas com conseqüente diminuição da resistência mecânica, aumento da deformabilidade e modificações das propriedades de porosidade. As características de alteração podem ser quantificadas em diferentes graus, em função de avaliação macroscópica das características petrográficas da rocha (Tabela 2.5)

Tabela 2.5.- Classificação de rochas quanto ao grau de alteração, segundo Guidicini & Nieble (1984), modificado.

Rocha	Símbolo	Descrição
Sã ou praticamente sã	A1	Sem sinais de alteração ou sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades
Alterada	A2	Alteração visível em todo maciço, mas a rocha não é friável
Muito alterada	A3	Alteração visível em todo maciço e a rocha é parcialmente friável ou o maciço apresenta-se completamente friável, praticamente com comportamento de solo

- Coerência: é expressa pela resistência que a rocha oferece ao impacto do martelo e ao risco com lâmina de aço (Guidicini et al.,1972). É um índice qualitativo, e de acordo com a resposta da rocha às solicitações, pode ser enquadrado em quatro níveis, conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Características de coerência das rochas intactas.

Rocha	Símbolo	Características
Muito coerente	C1	Quebra com dificuldade ao golpe de martelo O fragmento possui bordas cortantes que resistem ao corte por lâmina de aço Superfície dificilmente riscada por lâmina de aço
Coerente	C2	Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo O fragmento possui bordas cortantes que podem ser abatidas pelo corte com lâmina de aço Superfície riscável por lâmina de aço
Pouco coerente	C3	Quebra facilmente ao golpe de martelo As bordas do fragmento podem ser quebradas pelo pressão dos dedos A lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento
Friável	C4	Esfarela ao golpe do martelo Desagrega sob pressão dos dedos

- Em termos de resistência mecânica global, Brown (1981) recomenda as seguintes correlação com os valores da resistência à compressão uniaxial (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 Classificação de campo da resistência dos materiais rochosos e correlação com a resistência à compressão uniaxial, segundo Brown, (1981).

Grau	Descrição	Identificação de campo	Resistência (Mpa)
R0	Rocha extremamente fraca	Marcada pela unha.	0,25-1,0
R1	Rocha muito fraca	Esmigalha-se sob o impacto do martelo de geólogo, pode ser raspada pôr canivete.	1,0-5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada pôr canivete com dificuldade, marcada pôr firme pancada c/ a ponta do martelo.	5,0-25
R3	Rocha com resistência média	Não pode ser raspada pôr 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

2.2.2. Descontinuidades

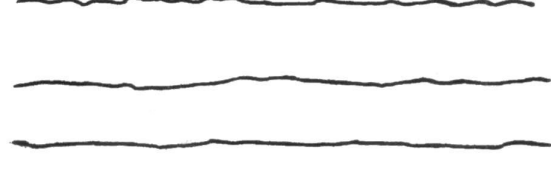
São quaisquer feições geológicas que interrompam a continuidade física de uma rocha intacta, ou seja, qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula ou muita baixa (ISRM,1983). É termo coletivo para a maioria dos tipos de juntas, planos de acamamento mais fracos, planos de xistosidade mais fracos, zonas de fraqueza e falhas. Um conjunto de descontinuidades com mesma orientação e origem caracteriza uma família e um conjunto de famílias define um sistema de descontinuidades.

A distribuição espacial e os parâmetros geométricos das descontinuidades são fundamentais na concepção do modelo estrutural e comportamento do maciço. As

descontinuidades são descritas por parâmetros (ISRM,1983), para uso em classificações geomecânicas, tais como:

- Orientação: é a atitude da descontinuidade no espaço, definida pela rumo do mergulho (azimute) e pelo mergulho da linha de maior inclinação sobre o plano da descontinuidade, dado pela interseção da descontinuidade com um plano horizontal imaginário.
- Espaçamento: é a distância medida perpendicularmente entre descontinuidades adjacentes de uma mesma família.
- Abertura: é a distância medida perpendicularmente entre paredes adjacentes de uma descontinuidade, cujo espaço intermediário é preenchido por ar ou água.
- Persistência: é a extensão do traço de uma descontinuidade ao longo de um afloramento, representando a penetratividade (extensão) da descontinuidade.
- Rugosidade: é expressa pelas ondulações existentes nas paredes de uma descontinuidade, podendo ser classificadas de primeira ou de segunda ordem. As ondulações de primeira ordem estão relacionadas com o fenômeno de dilatação durante o cisalhamento, enquanto que as ondulações de segunda ordem são mobilizadas durante o processo de cisalhamento. Assim, a rugosidade das paredes de uma descontinuidade é característica importante na quantificação de sua resistência ao cisalhamento, especialmente nos casos de juntas não preenchidas. A importância da rugosidade diminui à medida que a abertura ou material de preenchimento aumenta. Em resumo, as ondulações de primeira e segunda ordem são na realidade a rugosidade quando observadas numa escala maior (macro-rugosidade) e menor (micro-rugosidade), respectivamente. O meio mais prático de quantificar a rugosidade é identificar o seu perfil geométrico (ISMR, 1983), conforme referência apresentada na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 Perfis de rugosidade e da ondulação das paredes das discontinuidades (ISMR,1983).

<i>Perfil</i>	<i>Termo</i>
	<i>Rugosa (R)</i>
	<i>Lisa (L)</i>
	<i>Polida c/estria (E)</i>
	<i>Recortada (R)</i>
	<i>Rugosa (R)</i>
	<i>Lisa (L)</i>
	<i>Polida c/estria (E)</i>
	<i>Ondulada (O)</i>
	<i>Rugosa (R)</i>
	<i>Lisa (L)</i>
	<i>Polida c/estria (E)</i>
	<i>Plana (P)</i>

- Resistência das paredes: é a resistência da interface, ao longo das paredes de uma discontinuidade, sendo afetada pelo intemperismo e pelo grau de alteração das paredes.
- Preenchimento: é representado pelo material que preenche uma dada discontinuidade e que usualmente apresenta resistência mais baixa à da rocha intacta. Os materiais típicos de preenchimento são: areias, argilas, milonitos, brechas, siltes, quartzos, calcitas, etc. Os materiais de preenchimento tendem a apresentar uma grande variedade de comportamentos físicos quanto à resistência, deformabilidade e permeabilidade.
- Percolação: corresponde ao fluxo de água livres, visíveis em discontinuidades individuais ou ao longo do maciço rochoso.

- Número de famílias: é o número de famílias que compõem um dado sistema de descontinuidades. O maciço rochoso pode conter também descontinuidades individuais, como falhas, que influenciam o tamanho e a forma dos blocos isolados.
- Tamanho de blocos: é definido pelo número das famílias de descontinuidades presentes e pelo espaçamento das famílias individuais, sendo um indicador importante do comportamento global do maciço rochoso.

2.3. CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

As classificações geomecânicas foram desenvolvidas para se verificar a estabilidade do maciço pela sua compartimentação através da posição espacial, forma das descontinuidades e material de preenchimento, tendo por objetivo conhecer melhor o maciço rochoso e definir diferentes classes de seu comportamento geomecânico.

Tendo como objetivo conhecer melhor o maciço e compartimentá-lo em classes, é que se desenvolveram os sistemas de classificação que quantificam suas características, pela atribuição de notas, através de diversos parâmetros.

As classificações geomecânicas são sistemas orientados para a separação dos maciços rochosos em classes, a partir de características geomecânicas, que submetidas a determinada solicitação possuem comportamentos homogêneos.

Esse comportamento é baseado em características geológicas, geotécnicas e mecânicas do maciço, que vão conduzir à sua caracterização empírica, de forma que permita a previsão do comportamento dos maciços rochosos.

Segundo Gomes (1991), os critérios que sustentam as classificações geomecânicas visam a objetivos definidos. As ações de racionalização dos inúmeros parâmetros condicionantes do comportamento do maciço levaram a sistemas de classificações mais elaborados, com a setorização do maciço em classes, através do ordenamento e hierarquização de suas características.

As classificações geomecânicas foram propostas inicialmente, para escavações subterrâneas, sendo atualmente, muito utilizadas também para outras obras e o seu

emprego adequado depende da natureza da obra em destaque e a escolha do sistema de classificação pode ser conforme a finalidade, descrita na tabela abaixo, modificado por Goodman (1976) apud Almeida (1994).

Tabela 2.9. Sistema de classificações desenvolvidos para maciços rochosos e suas respectivas finalidades, modificado de Goodman (1976) apud Almeida (1994).

Finalidade	Referências
Gerais	John (1962), Ruiz (1966), Franklin et al (1971);
Túneis	Terzaghi (1946), Lauffer (1958), Bieniawski (1973, 1974, 1976, e 1979), Barton et al (1975);
Barragens	Cruz et al (1975), Bieniawski & Orr (1975), Camargo et al (1976), Serafim & Pereira (1983), Infanti & Sobrinho (1991);
Mineração	Laubscher (1977), Kendoraki (1983);
Taludes	Ducan & Goodman (1968), Steffen (1976), Romana (1985, 1988 e 1991), Romana & Izquierdo (1988), Laubscher (1988), Haines & Terbrugge (1991);
Deformabilidade	Serafim & Pereira (1983);
Resistência	Hoek (1983), Hoek & Brown (1988), Hoek et al (1992).

Entre as principais classificações geomecânicas (Tabela 2.9) destacam-se, Terzaghi (1946), Rabcewicz (1957), Deere (1964), Bieniawski (1973, 1976, 1984 e 1989), Barton et al. (1974), Laubscher (1977), Romana (1985) e Kirkaldier et al. (1988) apud Almeida (1994).

A seguir serão apresentadas as classificações de Barton et al. (1974), Bieniawski (1989) e Romana (1985) que são as mais utilizadas em projetos de engenharia.

2.3.1. Classificação de Barton, Lien e Lunde (1974) – Sistema Q

A partir de experiência em obras de escavações subterrâneas (Compilação de 212 casos históricos), Barton, Lien e Lunde (1974) pesquisadores do NGI (Instituto

Geotécnico da Noruega), propuseram o sistema de classificação Q para a determinação da qualidade do maciço rochoso de túneis. As classes são definidas pela expressão:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.1)$$

Sendo:

Q = índice de qualidade do maciço rochoso;

RQD = índice de designação da qualidade da rocha (Rock Quality Designation);

J_n = índice de influência do número de família das descontinuidades;

J_r = índice de influência da rugosidade das paredes das descontinuidades;

J_a = índice de influência da alteração das paredes das descontinuidades;

J_w = índice de influência da ação da água subterrânea;

SRF = índice de influência do estado de tensões no maciço no entorno da cavidade (Stress Reduction Factor)

Cada um dos três termos que compõem o índice Q são interpretados como:

[RQD/ J_n]: tamanhos dos blocos

[J_r/J_a]: resistência ao cisalhamento entre os blocos.

[J_w /SRF]: tensões ativas no maciço.

São parâmetros quantitativos para representar os efeitos individuais e podem variar dentro de certos intervalos:

RQD $\Rightarrow$ 10 a 100;

$J_n \Rightarrow$ 0,5 a 20;

$J_r \Rightarrow$ 0,5 a 4;

$J_a \Rightarrow$ 0,07 a 20;

$J_w \Rightarrow$ 0,05 a 1;

SRF $\Rightarrow$ 0,5 a 20

Avaliados os valores específicos para cada índice, calcula-se o parâmetro Q, que permite classificar nominalmente o maciço em uma das nove classes do sistema de classificação e, quanto maior o valor de Q, melhor será a sua qualidade.

Tabela 2.10. Classes de maciços rochosos (Barton, Lien e Lunde,1974).

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

Observações:

1. O sistema Q é mais sensível quanto à avaliação da influência da resistência das descontinuidades
2. O parâmetro SRF expressa a relação entre a resistência à compressão uniaxial do maciço e a tensão principal maior, e procura refletir a relaxação do maciço ao redor da escavação.
3. O sistema Q é obtido pela multiplicação entre os termos, que considera as influências das diferentes características do maciço.

2.3.2. Classificação de Bieniawski (1989) – Sistema RMR

O sistema de classificação geomecânico RMR (Rock Mass Rating) foi proposto por Bieniawski, (1974,1976,1984 e 1989). Foi elaborado com base em 268 casos reais e leva em consideração os seguintes parâmetros de caracterização dos maciços rochosos:

- Resistência à compressão uniaxial simples ou índice de compressão puntiforme;
- RQD;
- Espaçamento das descontinuidades;
- Padrão das descontinuidades;
- Ação da água subterrânea;
- Orientação relativa das descontinuidades/escavação

A partir de notas atribuídas a seis parâmetros fixos, em função dos níveis de variação, procede-se à classificação nominal do maciço rochoso pelo somatório dos valores determinados, obtendo-se assim o índice RMR, que, varia de 0 a 100, enquadrando o maciço, em uma classe que represente a sua condição geral

A resistência do material rochoso é caracterizada através da resistência à compressão simples.

O RQD é expresso em termos percentuais e corresponde a um índice de recuperação modificado.

O parâmetro referente ao padrão das descontinuidades envolve características de abertura, persistência, rugosidade, alteração das paredes, espessura e o tipo de material de preenchimento.

Tabela 2.11. Classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

Soma dos pesos (RMR)	100-81	80-61	60-41	40-21	≤ 20
Classe do maciço	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito Bom	Bom	Regular	Ruim	Muito Ruim
Coesão (Kpa)	>400	400-300	300-200	200-100	< 100
Ângulo de atrito	>45°	35°-45°	25°-35°	15°-25°	< 15°

Observações:

- Bieniawski (1989), propôs alguns gráficos com variação contínua de cada parâmetro e uma tabela para facilitar a interpolação de valores intermediários entre os limites dos parâmetros. Estes gráficos, além de reduzir as mudanças abruptas nos limites entre as categorias, servem para dirimir dúvidas na avaliação dos pesos.
- O grau de intemperismo da rocha está incluído na resistência à compressão simples da rocha intacta.
- Maciços com características muito distintas podem ser agrupados em uma mesma classe pois o RMR – resultado final dos valores é a soma dos parâmetros.

2.3.3. Classificação de Romana (1985) – Sistema SMR

Em 1985, Romana propôs um método fatorial, baseado em dados de campo, que oferecia uma boa adaptação da classificação de Bieniawski para o caso de taludes. É o sistema SMR (Slope Mass Rating) que resulta do ajuste do valor do RMR, através da soma de duas parcelas que contêm as influências da orientação relativa das descontinuidades ($F_1 \times F_2 \times F_3$) e do método de escavação do talude (F_4). Portanto a nota final do maciço é dada pela seguinte expressão:

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \text{ sendo} \quad (2.2)$$

segundo Romana (1985):

$F_1 \Rightarrow$ depende do paralelismo entre as orientações do talude e das descontinuidades. Pode variar de 1,00 (quando há paralelismo) até 0,15 (quando o ângulo é maior que 30° e a possibilidade de ruptura é muita baixa).

$F_2 \Rightarrow$ refere-se ao mergulho das descontinuidades para o caso de rupturas planas. De certo modo é uma medida da probabilidade de resistência ao cisalhamento da descontinuidades. Este valor varia de 1,00 para descontinuidades que mergulham mais de 45° (quase nenhuma descontinuidade possui ângulo de atrito maior), até 0,15 para descontinuidade com mergulho menor que 20° (apenas algumas estruturas lisas ou estriadas, preenchidas por material argiloso mole têm ângulo de atrito menor).

$F_3 \Rightarrow$ refere-se à relação entre os mergulhos do talude e das descontinuidades, onde foram mantidos os pesos originais propostos por Bieniawski (1989) para cada classe.

$F_4 \Rightarrow$ está relacionado aos diferentes métodos de escavação do talude, fixado empiricamente para os seguintes casos:

- Taludes naturais $\Rightarrow F_4 = 15,00$;
- Pré-fissuramento $\Rightarrow F_4 = 10,00$;
- Detonações suaves $\Rightarrow F_4 = 8,00$;
- Detonações normais $\Rightarrow F_4 = 0,00$;
- Detonações defeituosas $\Rightarrow F_4 = -8,00$;
- Escavações mecânicas $\Rightarrow F_4 = 0,00$.

Baseado em estudos de 31 casos de taludes com diferentes graus de instabilidade, Romana (1985), propõe uma correspondência entre as classes dos maciços, sua condição de estabilidade, os tipos de ruptura mais típicos e o tratamento usado para a estabilização dos taludes, conforme tabela abaixo:

Tabela 2.12 Classe de Estabilidade segundo o SMR (Romana, 1985).

CLASSE	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Descrição	Muito Ruim	Ruim	Normal	Boa	Muita Boa
Estabilidade	Totalmente Instável	Instável	Parcialmente Estável	Estável	Totalmente Estável
Rupturas	Grandes rupturas por planos contínuos ou pela rocha	Planares ou grandes cunhas	Algumas planares ou muitas cunhas	Alguns blocos	Nenhuma
Tratamento	Reescavação	Correção	Sistemático	Ocasional	Nenhum

Observações:

1. A classificação fornece apenas uma primeira aproximação para o projeto (Romana,1991);
2. A classificação tem sido usada para quantificar a influência das juntas na instabilidade de taludes (Romana, 1996).

CAPÍTULO 3

ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL: CONDICIONANTES GERAIS

3.1. A ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL

O município de Ouro Preto está inserido no contexto regional da estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero e apresenta um relevo bastante irregular, com elevações íngremes e vales encaixados, que comprometem significativamente a expansão e a evolução do seu núcleo urbano.

A cidade de Ouro Preto, apresenta hoje uma situação crítica e alarmante no que diz respeito a acidentes geológicos (Sobreira,1990), devidos aos condicionantes pré-existent: geologia, morfologia, topografia e clima são desfavoráveis (Carvalho,1982), somados aos ligados às formas de utilização do meio físico (Sobreira, Araujo e Bonuccelli, 1990).

Assim, é importante e necessária a busca de mais informações técnicas acerca do comportamento geomecânico das formações geológicas locais, pois as soluções apresentadas até agora para as regiões problemáticas de Ouro Preto, do ponto de vista geológico-geotécnico, são apenas qualitativas (Sobreira, Araújo e Bonuccelli,1990).

A encosta do Morro do Curral é problemática, com registros de sinais de movimentação de massa, e cicatrizes de instabilidades (Figura 3.1) ocorridas em períodos chuvosos mais intensos e prolongados, como os de 1979 e 1989 (Sobreira, Araújo e Bonuccelli, 1990).

Os problemas da encosta do Morro do Curral são de natureza específica, como a instabilidade manifestada através de superfícies de foliação a meia encosta. Há também o problema do escoamento de águas superficiais pela face dos taludes, que carregam grande quantidade de material fino para o córrego Caquende, na base da encosta, provocando o estrangulando do seu curso natural.



Figura 3.1. Cicatrizes de instabilidades identificadas na encosta do Morro do Curral.

Portanto, torna-se imperativo, para resolver o problema específico da ocupação da base da encosta, estudos específicos para um efetivo trabalho de estabilização global de todo o maciço sejam desenvolvidos.

3.2. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A encosta estudada fica a oeste da praça Tiradentes, entre as praças Barão de Rio Branco e Cesário Alvim, à jusante da rua Diogo de Vasconcelos, no eixo histórico da cidade de Ouro Preto (Figuras 3.2 e 3.3). A região tem divisas com os terrenos da Ferrovia Centro Atlântica, da Alcan Alumínio do Brasil e da Confluência dos Córregos da Água Limpa/dos Contos e do Caquende que deságuam no Ribeirão Funil (carta de adjudicação-PMOP).

Segundo a Carta Geotécnica de Ouro Preto (Carvalho,1982), as litologias na encosta do Morro do Curral são rochas da Formação Sabará, de geologia complexa pela variação do grau de metamorfismo, mas que podem ser genericamente designadas como xistos. A estrutura geológica xistosa, com fraturação descontínua do maciço e a declividade forte, produzem variações de comportamento, que podem induzir feições de instabilidade.

A ocupação da área na base da encosta do Morro do Curral nas condições que se encontra atualmente não satisfazem os critérios de segurança, custos e legalidade, considerando as recomendações previstas pela Carta Geotécnica de Ouro Preto (Carvalho,1982).

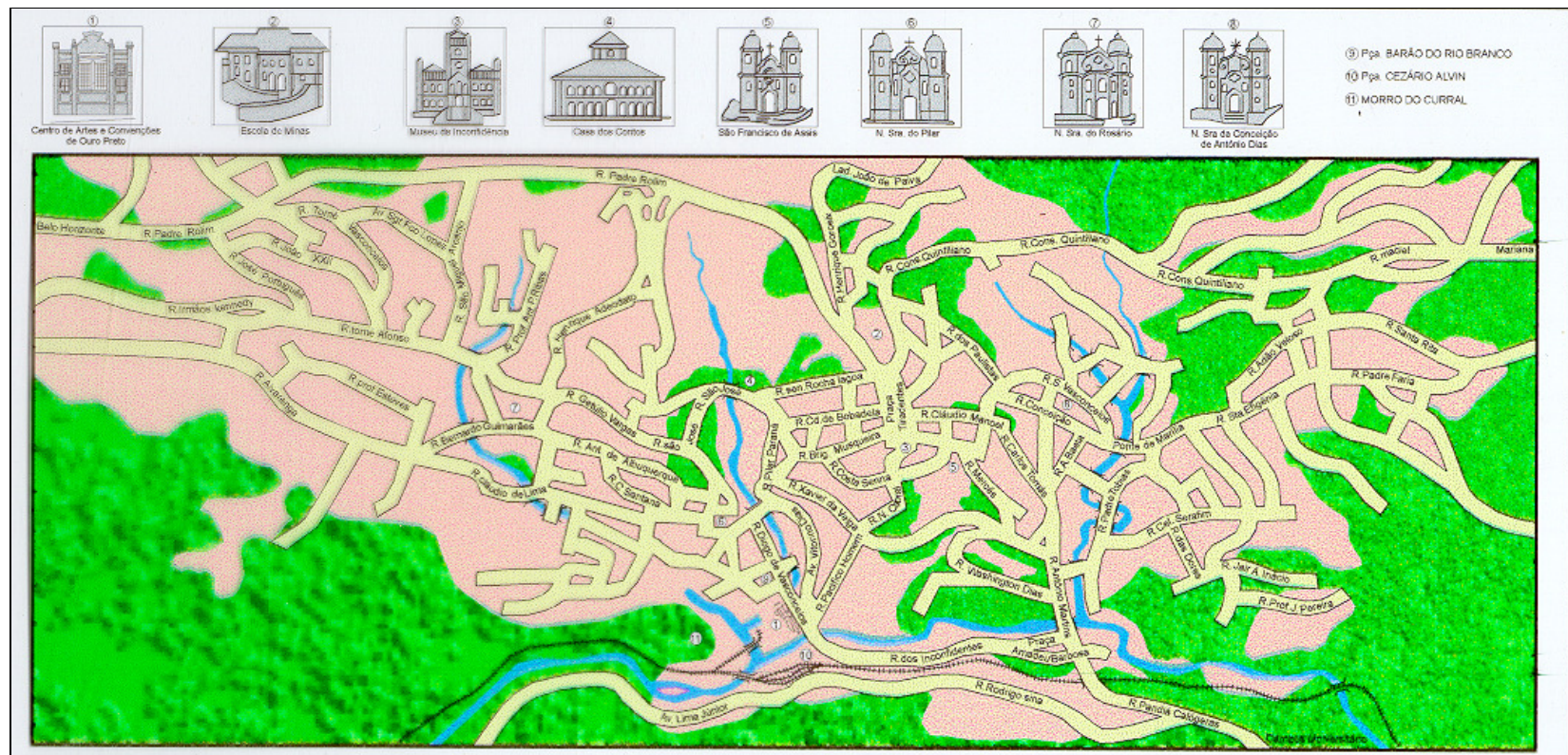


Figura 3.2. Localização da Encosta Morro do Curral no eixo histórico da cidade Ouro Preto,



Figura 3.3. Localização, no espaço urbano de Ouro Preto, da área em que se encontra a Encosta Morro do Curral.

3.3. IMPORTÂNCIA DA ÁREA

Na base da encosta do Morro do Curral, na área da confluência dos córregos da Água Limpa/dos Contos e do Caquende, está sendo construída uma grande estrutura de eventos – o chamado Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto, destinado a sediar congressos, convenções, núcleo de artes e criação, seminários, reuniões, conferências e eventos similares, com infraestrutura de atendimento para até 600 pessoas. Este projeto está orçado em torno de 6,5 milhões de reais e se enquadra num contexto de releitura de ocupação de prédios históricos e espaços subutilizados.

A necessidade deste complexo de eventos nasceu da constatação de que a cidade de Ouro Preto, no terceiro centenário de sua existência, encontra-se num cenário de crise devido a impasses nos setores primário e secundário da economia, além de não possuir tradição agropecuária. Por outro lado, a atividade de extração e processamento de minérios, sua principal fonte de recursos, encontra-se estacionária, tendendo ao declínio (Tourinho, 1990). Neste cenário, buscou-se uma alternativa que fosse capaz de

polarizar a consecução da reativação da economia local com a preservação e a ampliação da marca de Ouro Preto como pólo científico e cultural. Assim, as atividades educacionais e de turismo consolidaram-se como soluções, pois os investimentos básicos das mesmas já estão implementados.

A definição do espaço foi elaborada como sendo a alternativa mais adequada para integrar as características culturais e acadêmicas de Ouro Preto, com as instalações necessárias para abrigar eventos de expressão dentro do segmento de turismo de negócio (Norma, 1994). As instalações ocuparão uma área coberta de 7400 m², com restauração de 4300m² e construção de 3100m², sendo distribuído nos seguintes setores: um teatro de 900m² para 600 pessoas, um setor de feiras com 1300m², um setor de convenções com seis salas de reuniões interligáveis com cinquenta lugares cada uma e dois auditórios para cento e cinquenta pessoas cada, reversíveis para um auditório com trezentos lugares, um setor de exposição com 1200m², um setor de alimentação, um museu de metalurgia da Escola de Minas, um núcleo de criação e integração de artes cênicas, de músicas e de artes plásticas e visuais, uma administração central e um bloco de serviço. A tônica do conjunto é a versatilidade e integração dos espaços pois cada um dos setores poderá funcionar independentemente ou integrado aos demais, com isolamento térmico acústico.

A área ocupada é de 10900m² e é uma das poucas área planas de Ouro Preto, constituindo uma planície que se desenvolve da Igreja do Pilar até a Praça Cesário Alvim, que sempre foi tomada ao longo da história da cidade como ponto de referência para a sua urbanização.

A escolha do local de instalação do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto foi feita também em função da posição privilegiada no eixo histórico formado pelas praças: Barão do Rio Branco, Cesário Alvim e Amadeu Barbosa, que representam convergência urbana expressiva, oferecendo boas opções de acesso e de estacionamento que permitirão o descongestionamento de tráfego na Praça Tiradentes e na área central do município. (Figura 3.4).



Figura 3.4. Posição do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto no núcleo histórico do município.

3.4. ORIGEM E HISTÓRICO

A área abrigava uma antiga lagoa denominada Lagoa do Funil, que serviu de fonte de abastecimento de água para o funcionamento e construção de uma usina geradora de energia elétrica no local (século XIX, pelo francês Raymond Joyer), aproveitando a queda da água do Ribeirão Funil e fornecendo em caráter pioneiro, energia elétrica para a então capital da província.

Em 1883, o imperador D. Pedro II autorizou o esgotamento da lagoa para construção do ramal ferroviário para Conselheiro Lafaiete. Foram feitos, então, aterros

em grande parte da área, para abrigar o prédio da estação, oficinas de manutenção e residências para os engenheiros e funcionários da obra, fazendo com que as direções dos Córregos do Caquende, Água Limpa e dos Contos passassem a contornar a base da encosta do Morro do Curral. O material utilizado no aterro teve origem na abertura da atual Rua Pacífico Homem (Vasconcelos,1977). Estudos dos perfis de sondagens da área, realizados em 1995, constataram a execução de aterros sem controle de compactação, com mistura de entulho e aluvião com seixos rolados.

Em 1941, a área ocupada pelas oficinas da Nona Residência da Estrada de Ferro Central do Brasil foi cedida à Escola Nacional de Minas e Metalurgia da Universidade do Brasil (antiga denominação da atual UFOP), através do Ministério da Educação e Saúde, para instalação de uma pequena usina siderúrgica, onde alunos pudessem receber um ensino eminentemente prático do processo de beneficiamento do aço. Na montagem da unidade produtora de ferro gusa foi necessário fazer um capeamento no Córrego dos Contos e a conclusão dos trabalhos só ocorreu em 15 de setembro de 1956, com a primeira corrida do alto forno do Parque Metalúrgico Augusto Barbosa. As instalações posteriormente foram ampliadas em galpões para estoque de matéria prima para a promissora indústria automobilística brasileira (REM,1980).

Em 1964, por problemas ambientais relacionados à emissão de poluentes, a unidade industrial foi fechada e a oficina arrendada à Alcan Alumínio do Brasil. Em 1969, com a criação da Universidade Federal de Ouro Preto e a incorporação da Escola de Minas, as instalações do Parque Metalúrgico Augusto Barbosa foram transferidas para o patrimônio da Universidade, que instalou ali alguns setores como almoxarifado, serralheria, transporte, arquivo, serviço de patrimônio, quadra de esportes, serviço médico, etc.

Em julho de 1993, o Conselho Universitário da Universidade Federal de Ouro Preto aprovou o projeto de reestruturação do espaço físico do Parque Metalúrgico Augusto Barbosa para abrigar o Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto.

3.5. OBJETIVOS DO TRABALHO

Como objetivo primário, este trabalho buscou avaliar o comportamento geológico-geotécnico da encosta do Morro do Curral, particularmente em termos de sua vertente leste, pelos reflexos diretos de eventuais instabilidades da mesma sobre o espaço físico adjacente do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto.

Neste contexto, foram efetuadas análises sobre o comportamento geomecânico dos taludes rochosos da Formação Sabará, sobre as características físicas dos materiais existentes, sobre os processos geológicos que comandam os movimentos naturais de massa, e sobre a susceptibilidade à riscos geotécnicos a que pode estar submetido o local estudado. A produção de dados geomecânicos de rocha branda, que são escassos, teve o intuito de subsidiar critérios de projetos de contenções de encostas urbanas, no núcleo histórico de Ouro Preto.

Secundariamente, como objetivos mais específicos, podem ser enumerados: a contribuição para a evolução da caracterização geomecânica dos materiais do Quadrilátero Ferrífero, especificamente, em relação ao xisto da Formação Sabará numa encosta de taludes altos e íngremes; a comparação crítica entre os índices geomecânicos obtidos nas aplicações dos sistemas de classificação RMR (Bieniawski, 1989), SMR (Romana, 1985), e Q (Barton et al, 1974); o mapeamento topográfico, geológico e geotécnico de áreas urbanas e o zoneamento geotécnico de massas rochosas segundo parâmetros quantitativos. Outros estudos efetuados buscaram quantificar o estado de alteração, o grau de fraturamento e as condições das descontinuidades do maciço, bem como a comparação dos resultados das análises cinemáticas, através do programa DIPS 1.0 (“Data Interpretation Using Stereographic Projection”) e os processos de instabilização identificados nas campanhas de investigação de campo. A análise dos resultados, encontrados na aplicação dos diversos sistemas de classificação geomecânica no maciço rochoso, com a situação observada durante as campanhas de investigação de campo, visaram estabelecer subsídios para as soluções de estabilização mais adequadas para a encosta.

O estudo justifica-se pela localização da encosta, situada no eixo histórico de Ouro Preto e pelo ocupação da sua base com as edificações do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. Além disto, os estudos técnicos e científicos anteriormente realizados no local foram de caráter qualitativo e não quantitativo, não permitindo estabelecer parâmetros geotécnicos para a elaboração de um projeto de estabilização global da vertente leste da encosta do Morro do Curral.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

A metodologia do trabalho comportou quatro fases distintas de estudo: inventário e pesquisa de dados prévios, investigação de campo, ensaios de laboratório e análises globais dos resultados. Estas atividades muitas vezes foram realizadas concomitantemente, de acordo com a necessidade de complementação das informações obtidas.

Na primeira etapa do trabalho, foram realizadas a pesquisa bibliográfica, as análises das bases cartográficas e os trabalhos de fotointerpretação. Os trabalhos de campo (segunda etapa) envolveram levantamentos topográficos e geológico-geotécnicos, a setorização do maciço, a caracterização geológica dos setores e a amostragem de solos e rochas para ensaios de laboratório. Na terceira etapa (ensaios de laboratório) foram realizados ensaios de caracterização física de solos e rochas, a análise petrográfica e ensaios de cisalhamento direto e de carga puntual. Na quarta etapa, correspondente às análises e interpretação dos resultados, foram aplicados e comparadas as diversas classificações geomecânicas, feita a análise cinemática de estabilidade dos taludes e a elaboração de soluções conceituais para a estabilização da encosta.

4.1. COLETA E ANÁLISE DE DADOS EXISTENTES

Visando um melhor conhecimento histórico da encosta e de sua ocupação, assim como problemas anteriores de movimentos gravitacionais de massa, fez-se um completo levantamento de dados através de contatos com antigos moradores e pesquisas em diferentes organismos municipais (Cartórios, Fundação Pró-Memória, Arquivo Municipal, Cadastro de Registro da Prefeitura Municipal de Ouro Preto, Museu da Inconfidência, etc).

Como base técnica e científica para a execução do trabalho, procedeu-se a uma revisão da literatura técnica, englobando preliminarmente os conceitos e princípios da Mecânica de Rochas, aplicada a taludes de encostas naturais. Foram abordados os principais aspectos relativos aos movimentos de massa rochosa, incluindo-se os sistemas de classificação geomecânica mais utilizados e as análises de estabilidade de taludes, assim como estudados os procedimentos técnicos para execução de ensaios laboratoriais.

A análise da cartografia existente englobou as bases topográficas e os levantamentos geológico-geotécnicos existentes, a análise preliminar das fotos aéreas e ortofotos. Nos trabalhos de fotointerpretação, foram analisados e interpretados os conjuntos de fotos aéreas do Morro do Curral dos anos de 1950 (escala 1:25.000); 1969 (escala 1:10.000); 1979 (escala 1:8.000) e 1986 (escala 1:30.000), utilizando-se um aparelho Mirror Stereoscope MS27, equipado com binoculares (3x), com 70 mm de campo de vista. Analisou-se a evolução da ocupação da encosta, buscando correlações entre as formas de ocupação e uso e sua influência nos processos desestabilizadores.

4.2. TRABALHOS DE CAMPO

4.2.1. Levantamento Topográfico

Os trabalhos topográficos constaram de um levantamento pormenorizado, por estação total, da encosta, que possibilitou a elaboração de um mapa topográfico na escala 1:750, gerado pela utilização do programa Autocad-R14. Neste levantamento, tomou-se atenção especial com a determinação da altura, largura e inclinação dos taludes e escarpas existentes, conferindo um alto grau de detalhamento ao mapa produzido. Este mapa serviu para obtenção dos dados geométricos para as análises de estabilidade da encosta.

4.2.2 Levantamento Geológico-estrutural

Com a finalidade de caracterizar o modelo estrutural da encosta, fez-se uma análise geral do maciço rochoso, com a obtenção de dados das principais estruturas geológicas presentes. Neste levantamento, utilizou-se bússola equipada com clinômetro do tipo Bruuton, sendo os dados lançados numa base topográfica 1:750. Este levantamento possibilitou a elaboração de bloco diagrama representando a estrutura geral da encosta. O bloco diagrama foi construído pelo programa de desenho Canvas.

4.2.3. Levantamento Geológico-geotécnico

Os estudos geológico-geotécnicos foram executados a partir da tomada de dados de campo de toda a encosta, lançados na base topográfica 1:750. Foi produzido um mapa geológico onde foram plotados todos os tipos de materiais presentes (afloramentos rochosos, depósitos superficiais, solos de cobertura, blocos rochosos e depósitos de aluvião); as estruturas geológicas (foliação e fraturamento); os pontos de amostragem de solos e rochas e as principais feições morfológicas. Estes trabalhos de campo possibilitaram a elaboração de um mapa geotécnico, representando os processos (escorregamento translacional, queda e rolamento de blocos, corrida de tálus e erosão fluvial) e seu estado de atividade (ativa, inativa/latente e estabilizada), assim como os materiais envolvidos (rocha, rocha/detritos e tálus).

4.2.4. Setorização e Caracterização do Maciço

De forma a facilitar a caracterização do maciço, procedeu-se à sua divisão em setores, procedimento convencional neste tipo de análise. A encosta foi dividida em vinte setores, designados por números, definidos com base nos seguintes critérios: a) condições de acesso; b) dimensões (extensão horizontal de no mínimo 5 m e no máximo de 15m); c) representatividade (comportamento relativamente homogêneo).

A caracterização do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral foi processada através do estudo das descontinuidades, de acordo com os parâmetros indicados pela ISRM (1983) para a descrição quantitativa das descontinuidades. Para tal, confeccionou-se fichas de campo (anexo 1), onde foram sistematizadas as informações a serem coletadas:

- dimensões e inclinação da encosta;
- dimensões e inclinação dos setores;
- tipos litológicos presentes;
- grau de coerência, estado de alteração e classe de resistência da rocha;
- número, tipo e distribuição das famílias de descontinuidades;
- condições de percolação da água no maciço;
- abertura e espaçamento das descontinuidades;
- condição de preenchimento das descontinuidades;
- condição da micro e macro-rugosidade;

A descrição geral das rochas foi feita considerando os seguintes aspectos:

- cor;
- grau relativo de alteração;
- resistência;
- grau de coerência;
- tipo e natureza das estruturas presentes: foliação, trincas, falhas, dobramento, etc;
- outras características, tais como petrografia, presença de minerais ligados a processos de alteração, zonas de cisalhamento, etc.

Na análise das descontinuidades, o método adotado para a coleta dos dados consistiu em identificar as características de cada família de descontinuidade em cada setor, utilizando-se bússola com clinômetro, trenas, réguas, martelo de geólogo, canivete e planilhas de campo. Foram descritas e mensuradas feições das descontinuidades de interesse para caracterização e classificação do maciço rochoso. A descrição quantitativa seguiu as recomendações da ISRM (1983).

Os parâmetros quantitativos utilizados para a caracterização das descontinuidades foram: orientação, espaçamento, persistência, rugosidade das paredes, abertura,

preenchimento, resistência das paredes, fluxo de água, número de famílias e tamanho de blocos.

Após as investigações de campo, com o conseqüente preenchimento das fichas, o passo seguinte foi a digitação e sistematização dos dados envolvendo cálculos complementares em escritório.

4.2.5 Amostragem (solos e rochas)

As amostras de solos para execução dos ensaios foram coletadas nos setores da encosta, com ocorrência de solos de recobrimento. Foram coletadas amostras em quatro pontos da alta vertente, conforme norma brasileira NBR 6502/80.

As amostras para ensaios de rocha foram coletadas/retiradas em nove pontos, com picareta, pá, martelo de geólogo e arco de serra. As amostras coletadas para a realização de ensaios de caracterização física e cisalhamento direto foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas com cuidado para o Laboratório de Geotecnia/EM para preparação dos respectivos corpos de prova.

As amostras destinadas aos ensaios de compressão puntiforme, foram coletadas com o cuidado de serem representativas do afloramento rochoso, com formato aproximadamente prismático-retangular, com faces irregulares. Os procedimentos adotados na amostragem foram baseados nas normas brasileiras NBR 6490/85 e 6502/80 da ABNT.

4.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIOS

As amostras recolhidas nos vários setores foram analisadas em laboratório, com a finalidade de caracterização física e identificação do comportamento mecânico, tanto dos materiais rochosos como do solo de cobertura. Os ensaios foram executados no Laboratório de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, de acordo com normas e especificações da ABNT e ASTM.

4.3.1. Solos de Cobertura

A preparação das amostras foi realizada em conformidade com a norma brasileira NBR 6457/84. O material foi quarteado, tendo em vista obter uma homogeneização do solo e reduzir o tamanho da amostra, mantendo a representatividade do todo. Foram realizados ensaios de determinação dos índices físicos, teor de umidade, peso específico aparente e peso específico dos grãos (NBR 6508/84, ABNT). A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, seguindo as especificações da norma NBR 7181/84 da ABNT. Os estados de consistência foram determinados seguindo a norma NBR 6459/84 da ABNT (limite de liquidez) e NBR 7180/84 da ABNT (limite de plasticidade e índice de plasticidade).

4.3.2. Rochas

Os materiais rochosos foram caracterizados fisicamente, petrograficamente e por sua resistência ao cisalhamento direto e carga pontual. Na determinação da densidade dos grãos, aplicou-se a norma NBR 6508/84, ABNT. Nos ensaios de determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água aparente, aplicou-se a norma brasileira NBR 12766/92 da ABNT.

Das amostras de rocha, foram extraídos fragmentos de cerca de cinco centímetros, representativos das suas feições macroscópicas, para a confecção de lâminas delgadas, conforme procedimentos recomendados na norma NBR 12768/92, da ABNT. Utilizou-se na análise petrográfica microscópio óptico de luz polarizável, registrando-se a textura, composição mineralógica com indicação, em porcentagem, dos minerais, natureza e classificação da rocha, estado microfissural e estado e tipo de alteração dos minerais.

Para os ensaios de cisalhamento direto, a preparação das amostras foi feita manualmente e com auxílio de uma serra diamantada, para a moldagem de corpos de prova, de seção quadrada, com dimensões aproximadas de 10x10x2 cm. Os corpos de prova foram preparados no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia –

DEGEO da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Foram realizados duas séries de ensaios, tanto na direção paralela, como na perpendicular à foliação. Tentou-se utilizar a norma americana D 5607/95, para ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova rochosos, mas devido a impossibilidade de moldagem os corpos de prova nas dimensões recomendadas, decorrente da fragilidade do xisto, usou-se os procedimentos da norma americana D 3080/90, para ensaios de cisalhamento direto em amostra indeformada de solo. O ensaio foi realizado em uma prensa convencional de cisalhamento a deformação constante.

O procedimento consistiu em se aplicar cargas normais (N), através da colocação de pesos em um pendural simples, e, em seguida, aplicar-se esforços tangenciais (T) crescentes, provocando o deslocamento de uma das partes da caixa em relação à outra, até a ruptura, controlando-se a velocidade de deformação do corpo de prova, que foi de 0,8550 mm/s.

Realizou-se o ensaio para os estágios de aplicação de tensão normal iguais aos valores de 20kPa, 50 kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa e 400kPa, simulando em laboratório, a situação real da encosta (altura e profundidade). Os ensaios foram realizados em baterias de três corpos de prova para cada estágio de aplicação de tensão normal e calculada a média nas duas séries.

Após realizados os ensaios, os dados foram sistematizados em uma planilha eletrônica, em termos dos resultados das tensões normais e cisalhantes no plano de ruptura, respectivamente, $\sigma=N/A$ e $\tau=T/A$, onde A é a área da seção transversal do corpo de prova, sem correção. Plotou-se as curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais, deformações verticais x deslocamentos e tensões cisalhantes x tensões normais. As envoltórias de resistências foram traçadas para as condições de pico, obtendo-se o ângulo de atrito e o intercepto de coesão.

Nos ensaios de compressão puntiforme, adotou-se os procedimentos recomendados pela norma americana D 5731/95 da ASTM. Foram realizados um total de 46 ensaios.

4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.4.1. Classificação Geomecânica

Com base nos dados de campo e laboratório, procedeu-se a classificação geomecânica do maciço segundo os sistemas de Bieniawski (1989), Romana (1985) e Barton et al. (1974). Fez-se o enquadramento das classes de comportamentos geomecânicos, condição geral do maciço, tipos de rupturas, condição de estabilidade, necessidade de tratamento e correlações com parâmetros de resistência e correlações empíricas. A comparação dos resultados possibilitou o zoneamento do maciço segundo o comportamento geomecânico potencial, possibilitando a elaboração de um mapa de comportamento geomecânico.

4.4.2. Análise Cinemática

Na análise cinemática dos taludes, usou-se o programa DIPS 1.0 (Data Interpretation Using Stereographic Projection). No uso deste programa o primeiro passo foi a elaboração dos diagramas de frequências, tanto para a foliação quanto para as famílias de fraturas, visando a determinação da atitude preferencial destas feições. A análise compreende a avaliação de grandezas que permitam quantificar o quão próximo da ruptura a encosta se encontra, considerando o conjunto de condicionantes atuantes. A qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos do software são diretamente dependentes dos parâmetros obtidos nos estudos de caracterização geológico-geotécnica do maciço.

Na análise cinemática, fez-se a representação espacial das relações entre as atitudes das estruturas geológicas presentes no maciço e as atitudes dos taludes, lançadas em rede estereográfica com projeção equatorial de rede de igual área (projeção de Lambert-Schmidt), possibilitando a previsão da geometria mais provável de instabilização. Este estudo levou em consideração o método desenvolvido por Markland (1972), para determinar a possibilidade de ocorrência de ruptura em cunha e planar. O

teste de Markland , cujo objetivo é determinar a possibilidade de ocorrência de rupturas em cunha, nas quais o deslocamento se realiza ao longo da linha de interseção de dois planos de descontinuidades. A ruptura planar, caso particular da ruptura em cunha, também pode ser detectada por este teste (Figura 4.1).

Pode-se dizer que o deslocamento somente ocorre se a inclinação (caimento) da linha de interseção dos planos for menor do que o mergulho da face do talude, medido na direção desta linha de interseção. O talude deve ser considerado potencialmente instável quando o ponto de interseção dos dois planos está dentro da área limitada pelo grande círculo que representa a face do talude, e pelo círculo definido pelo ângulo de atrito ϕ (ver Figura 4.1)

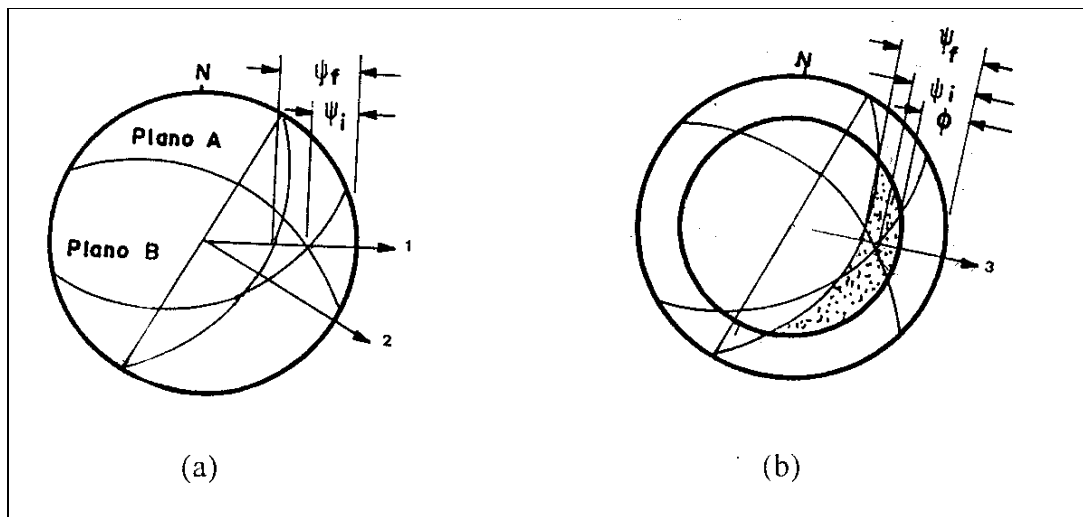


Figura 4.1 – Teste de Markland – para análise cinemática de rupturas, considerando o ângulo de atrito.

O deslocamento ao longo da linha de interseção dos planos A e B é possível quando o caimento desta linha é menor do que o mergulho da face do talude, medido na direção do deslocamento, ou seja: $\Psi_f > \Psi_i$ (a).

Deverá ocorrer deslocamento quando o caimento da linha de interseção é superior ao ângulo de atrito, ou seja:

$$\Psi_f > \Psi_i > \emptyset \text{ (b)}$$

- (1) Direção de deslocamento
- (2) Direção de mergulho da face do talude
- (3) O talude é potencialmente instável quando a interseção dos grandes círculos que representam os planos cai na região pontilhada. (Hoek & Bray, 1981)

Os dados gerados no programa são superfícies com potencial de ruptura e foram comparados com as observações de campo.

4.4.3. Identificação dos Riscos Geológicos

O risco geológico é caracterizado como uma situação de perigo, perda ou dano, ao homem e às suas propriedades, em decorrência da possibilidade de acontecimento de processo geológico induzido ou não. A susceptibilidade de uma encosta com relação a determinado processo geológico é definida como sendo a possibilidade de sua ocorrência, sem conseqüências sociais e econômicas.

Utilizando os conceitos de susceptibilidade e de risco, identificou-se as situações de risco atual e potencial e as medidas de prevenção em cada setor.

A situação de risco atual identifica um risco instalado (ou efetivo) em áreas já ocupadas, enquanto o risco potencial expressa, na verdade, a susceptibilidade à ocorrência de processos geológicos em áreas ainda desocupadas.

4.4.4. Métodos Gerais de Estabilização

Segundo Carvalho (1991), os principais tipos de métodos de estabilização de taludes e encostas estão listados na tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1. Tipos de métodos de estabilização de taludes e encostas (Carvalho, 1991).

Grupos	Tipos
Obras sem estrutura de contenção	• Retaludamentos (corte e aterro) • Drenagem (superficial, subterrânea, de obras) • Proteção superficial (naturais e artificiais)
Obras com estrutura de contenção	• Muros de gravidade • Atirantamentos • Aterros reforçados • Estabilização de blocos
Obras de proteção	• Barreiras vegetais • Muros de espera

As obras com estruturas de contenção podem ser classificadas em:

1. Obras de contenção passivas: apresentam reação contra tendências de movimentação dos taludes, como por exemplo, muros de arrimo (gravidade, flexão, etc), cortinas cravadas e cortinas ou muros ancorados sem protensão.
2. Obras de contenção ativas: Produzem compressão no terreno, aumentando sua resistência por atrito, além de oferecer reações às tendências de movimentação do talude, como por exemplo, muros e cortinas atirantadas, placas atirantadas, etc.
3. Obras de reforço de maciço: são aquelas que proporcionam um incremento à resistência média ao cisalhamento de certas porções do maciço, como por exemplo, injeções de cimento ou de resinas químicas, estacas e micro-estacas de concreto, etc.

Com base na tabela 4.1, combinou-se diversos tipos de obras e usou-se técnicas de estabilização mais simples como proteção superficial, estrutura de contenção e drenagem, como resultado final do estudo de caracterização geológico-geotécnica e do entendimento dos processos envolvidos na movimentação de massa na encosta. Estas soluções tendem a atuar diretamente nos agentes e causas da instabilização verificada na encosta e estão adequadas como sendo mais econômicas no contexto de uma relação custo/benefício otimizada.

Adicionalmente, pretende-se que a utilização destes tipos de obras de estabilização da encosta esteja inserida na prática da engenharia naturalística, visando a integração com a ecologia, minimizando o impacto ambiental causado pela ocupação da encosta e proporcionando a sua reinserção ao ambiente natural.

MODELO GEOMECÂNICO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL

5.1. GEOMORFOLOGIA DA ENCOSTA

A encosta do Morro do Curral está localizada no lado direito da Rua Diogo de Vasconcelos, no eixo histórico de Ouro Preto, no sentido Praça Barão de Rio Branco para Praça Cesário Alvim. A encosta é limitada a leste (pé da encosta) pelos Córregos Caquende e Água Limpa/dos Contos, e a oeste, pela vertente natural (crista da encosta).

Morfológicamente a encosta tem inclinação média de 45° , amplitude na ordem dos 50m, comprimento na base de 151m, e extensão na base de aproximadamente de 17m, posicionada entre as cotas 1056 e 1106 (Anexo 2). A encosta apresenta perfil irregular, com escarpas quase verticais e aproximadamente paralelas, e vertentes irregulares, com declives variáveis. As escarpas (Figura 5.1) são condicionadas por fraturas plano-axiais das dobras, representando a transição flanco-charneira, e as vertentes (Figura 5.2) – nome empregado para designar os trechos menos íngremes (flancos da dobra).



Figura 5.1 Escarpas da Encosta do Morro do Curral.



Figura 5.2 Vertentes da Encosta do Morro do Curral.

A encosta apresenta no topo uma cobertura vegetal rasteira e na base uma conformação longitudinal em “S”. Nas vertentes há depósitos de tálus desnudos (sem manto vegetal), que se localizam a jusante das linhas de drenagem principais (talvegues). Estes depósitos são compostos por blocos e lascas rochosas de tamanhos variando de métricos a decimétricos e apresentam sinais de movimentos recentes. As declividades observadas mostram patamares médios de 45° , valores estes muito próximos ao mergulho apresentado pela foliação (Figura 5.3).

A drenagem é representada por dois talvegues principais (linhas de drenagem), um na região central e outro mais a norte. Eles captam e direcionam a maior parte das águas superficiais. Na zona inferior da encosta, não há linhas de drenagem bem definidas, sendo o escoamento superficial irregular, com fluxos de água por toda a superfície da vertente, com sulcos erosivos generalizados neste trecho. No sopé da encosta, os Córregos Caquende e Água Limpa/dos Contos formam a calha natural das águas de escoamento superficial (Figura 5.4).



Figura 5.3. Vista geral da encosta Morro do Curral.



Figura 5.4. Vista parcial da calha de drenagem da encosta do Morro do Curral.

5.2. GEOLOGIA LOCAL

O maciço rochoso da encosta do Morro do Curral pertence à Formação Sabará, Super Grupo Minas. A Formação Sabará possui regionalmente litologia complicada e espessura variada. Na ocorrência típica, é composta de filitos, xistos, lentes subordinadas de grauvacas ou subgrauvacas, tufos metamorfoseados e camadas finas de quartzito, localmente rico em ferro (Dorr II, 1970). As litologias apresentam cores verdes a acinzentadas e com bandejamento rítmico de espessura milimétrica.

O tipo litológico encontrado no local de estudo é constituído por um xisto cinza, intercalado por veios de quartzo de espessura variada; concordantes ou não com a xistosidade. O xisto encontra-se, em alguns pontos, mais alterado, com coloração marrom a avermelhado. Apresenta-se também, muito frágil, quebradiço e muito fraturado, localmente oxidado. A textura é de rocha com granulometria média a grossa (diâmetros dos grãos minerais compreendido entre 1 - 5 mm), caracterizada pela orientação mais ou menos paralela dos componentes minerais, principalmente lamelares (mica, clorita) e prismáticos (anfíbólios). Os outros componentes minerais (quartzo, feldspato, etc.) também tendem a orientar-se e tal disposição orientada determina a foliação da matriz rochosa, segundo planos paralelos ou sub-paralelos. Em alguns locais, o xisto, encontra-se coberto por solo areno-siltoso e silto-argiloso de pequena espessura (da ordem de 5 a 10 cm).

A encosta situa-se no flanco leste de uma dobra aberta, com eixo na direção aproximadamente N/S, mergulhando 20 - 30° para sul, com flanco bem inclinado mergulhando para E (30-45°). A zona de charneira no segmento sul da encosta está localizada no terço inferior da encosta e no segmento norte no terço superior. A foliação é aproximadamente horizontal na zona de charneira e mergulha de 20 a 50° para E no flanco. Apesar de ser possível a caracterização de atitudes gerais, geralmente a foliação está ondulada. Estas ondulações condicionam localmente a inclinação das vertentes (zona do flanco E da dobra).

Provavelmente a dobra se repete à montante no maciço, mas não há afloramentos que permitam a certificação deste fato e as condições de estabilidade são

boas. Já no trecho inferior da encosta, onde se manifestam as instabilizações, o modelo estrutural está condicionando o comportamento geral do maciço (Figuras 5.5 e 5.6).

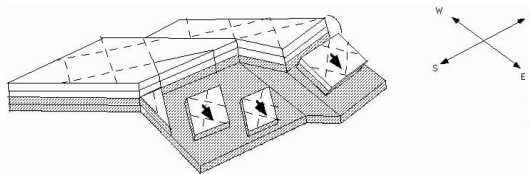


Figura 5.5. Representação do bloco-diagrama do modelo estrutural.



Figura 5.6. Vista da dobra estrutural da Encosta do Morro do Curral.

No segmento mais ao norte, a encosta está bem mais perturbada por se tratar de zona de falha, tratando-se de um falhamento regional, de direção EW que corta o Morro do Curral e se estende até o Morro da Forca, a outra vertente do Vale do Caquende. A foliação é variável e apresenta dobras em ziguezague (“Kink-bands”), com eixo EW e flancos N e S (Figura 5.7).

Esta parte da encosta não foi analisada com o mesmo detalhe do restante por não estar próxima à área edificada, portanto, tendo pouca influência no domínio do empreendimento.



Figura 5.7. Influência da zona de falha na encosta do Morro do Curral.

Embora a foliação seja proeminente, detecta-se também perfeitamente a presença de duas famílias de discontinuidades (superfícies de fratura), persistentes e subverticais, com rumo de mergulho respectivamente 50° e 130° , abertas em alguns pontos e, em outros, preenchidas por material argilo-siltoso de cor marrom e/ou amarelado. Este sistema de discontinuidades condiciona profundamente as superfícies de ruptura, provocando os movimentos da massa rochosa (Figura 5.8).

As duas famílias de fraturas subverticais são responsáveis predominantemente pela infiltração de água no maciço. Em quase todas as escarpas, constata-se surgências de água no período chuvoso.



Figura 5.8. Escorregamento, condicionado pelo sistema de descontinuidades da encosta.

Ocorrem ainda depósitos de cobertura representados por solos, depósitos de vertentes (tálus) e depósitos aluviais. Os solos são pouco espessos e predominam no topo da encosta e nas zonas mais estáveis, estando geralmente recobertos por vegetação rasteira. São geralmente silto-argilosos ou areno-siltosos e têm pouca importância no comportamento geral da encosta.

Os depósitos de tálus são formados predominantemente por blocos e lascas do xisto, envolvidos por matriz fina e fragmentos menores da rocha. Ocorrem em duas feições maiores, uma mais ao sul e outra ao norte, sendo que a primeira mostra maiores sinais de instabilização. Este material, juntamente com os inúmeros blocos e lascas rochosos, são os principais problemas de movimentos de massa ao longo da encosta devido à sua situação de instabilidade.

Os depósitos aluviais restringem-se à calha do Córrego do Caquende, na porção norte da área. São constituídos por areia, cascalho e argila, além de material de origem antrópica, depositado ao longo do curso.

O mapa geológico resultante dos levantamentos de campo encontra-se no anexo 3.

5.3. SETORIZAÇÃO DA ENCOSTA

Os levantamentos de campo foram realizados em etapas sucessivas, a partir de maio de 1999 até março de 2000, sendo os resultados plotados em mapa (Anexo 3) na escala 1:750. Foram identificados 20 setores, a partir das descontinuidades mais importantes que interceptam o maciço e o domínio das feições, nos vários taludes ao longo da encosta, levando em consideração os seguintes critérios: a) condições de acesso; b) a extensão horizontal de no mínimo 5m e no máximo 15m; c) representatividade da área a ser estudada.

A caracterização do maciço rochoso foi processada de acordo com os parâmetros indicados pela ISRM (1983) para a descrição quantitativa da descontinuidades (atitude, persistência, espaçamento, abertura, preenchimento, percolação, rugosidade). Dentro das campanhas de inspeção de campo, procedeu-se à abertura de 8 trincheiras ao longo da encosta, para verificação das descontinuidades e determinação da foliação. Em alguns setores com morfologia mais irregular, foram definidos escarpas (degraus subverticais) e vertentes (relevos mais suaves). Os dados geométricos medidos no campo para as diferentes zonas de compartimentação do maciço estão sistematizados na tabela 5.1.

Tabela 5.1. Geometria dos setores do maciço rochoso da Encosta do Morro do Curral.

Setor	Talude	Cota	Extensão (m)	Altura (m)	Inclinação (°)
1	E1	1075	10	5	90
	E2	1080	10	7	90
	V1	1070	15	15	45
2	E2	1082	14	12	90
	V1	1078	14	18	45
3	E3	1090	6	7	90
	V2	1083	6	24	38
4	E4	1092	8	4	90
	V2	1088	8	28	38
5	E5	1096	14	6	90
	V3	1085	14	30	51
6	E6	1099	15	4	90
	E7	1095	10	12	90
	V4	1085	25	23	54
7	E8	1104	25	15	90
8	T1	1089	20	5	90
	E2	1084	25	6	90
	V5	1078	25	18	34
9	E9	1109	18	35	90
	E10	1074	18	15	90
10	V6	1099	7	40	90
11	V7	1099	16	40	38
12	V8	1104	10	5	50
13	V9	1107	25	8	90
14	V10	1115	20	6	45
15	V11	1130	30	20	40
16	V12	1107	10	8	90
17	V12	1110	8	15	90
18	E11	1106	5	3	90
	V13	1095	20	15	40
19	V14	1124	15	40	60
20	V15	1089	30	30	50

Obs.: E indica escarpa e V indica vertente.

5.3.1. Caracterização das Descontinuidades

No geral, pode-se dizer que o sistema de descontinuidades é formado pela foliação e por duas famílias de fraturas. A foliação (F1) tem atitude variável, conforme o setor da encosta. Na região da dobra, tende a ser subhorizontal nas charneiras e paralela à superfície nos flancos sendo muito variada nos setores mais ao norte, afetados pelo dobramento regional (Figura 5.9). As famílias de fraturas (F2 e F3), ambas

subverticais, mergulham uma na mesma direção e outra contra as inclinações dos taludes (Figura 5.10). Além destas descontinuidades principais, há ainda duas famílias (F5 e F6) de fraturas horizontais, que aparecem ocasionalmente em alguns setores (Figura 5.11). Nota-se também a perturbação da foliação pela presença da dobra tipo “kink bands”, nos setores mais ao norte da encosta. A tabela 5.2 mostra o resumo das características das descontinuidades em cada setor.



Figura 5.9. Setor geotécnico 5, principal descontinuidade família de foliação (F1).



Figura 5.10. Vista das famílias de fraturas (F2 e F3).



Figura 5.11. Vista geral das famílias de fraturas horizontais no setor 8.

Tabela 5.2. Caracterização das descontinuidades por setores do maciço rochoso.

Setor	Descontinuidade	Atitude	Espaçamento (m)	Persistência (m)	Percolação	Abertura (cm)	Preenchi_ mento
1	FoliaçãoF1	085/50	< 0,20	10	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	5	7	Seco	1	Silte
	FraturaF2	050/90	2	8	Seco	0,05	Sem
2	FoliaçãoF1	070/78	0,20	14	Seco	1	S V
	FoliaçãoF1	082/52	< 0,20	14	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	2,13	12	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	2,66	7	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	090/39	< 0,20	14	Seco	< 0,05	Sem
3	FoliaçãoF1	080/58	< 0,20	14	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	090/60	< 0,20	14	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	078/44	0,50	14	Seco	1	S V
	FraturaF2	050/90	3	16,5	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	1,06	2,16	Seco	< 0,05	Sem
4	FoliaçãoF1	070/36	0,50	15	Seco	0,50	S V
	FraturaF2	050/90	1,64	4,34	Seco	0,07	S V
	FraturaF3	130/90	1,87	3,25	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	078/45	0,50	15	Seco	< 0,05	Sem
5	FoliaçãoF1	090/54	0,06	32	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,50	32	Seco	2	S V
	FraturaF3	130/90	1	14	Seco	2	S V
	FraturaF4	080/90	12	5	Seco	5	Silte
	FoliaçãoF1	080/45	0,06	32	Seco	< 0,05	Sem
6	FoliaçãoF1	140/25	0,06	14	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	1,5	40	Got.	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	2	18	Got.	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	090/20	0,06	14	Úmido	< 0,05	Sem
7	FoliaçãoF1	175/07	0,06	25	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	1,5	25	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	2	15	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	090/20	0,06	25	Úmido	< 0,05	Sem
8	FoliaçãoF1	175/07	0,06	25	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	3	25	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	3	30	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF5	230/05	2	25	Seco	10	S V
	FoliaçãoF1	115/30	0,06	25	Seco	< 0,05	Sem
	FoliaçãoF1	090/20	0,06	25	Seco	< 0,05	Sem
9	FoliaçãoF1	160/30	< 0,20	50	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	1	18	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	1	50	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF6	170/90	2	50	Seco	< 0,05	Silte
	FoliaçãoF1	260/12	3	3	Seco	10	Silte
	FoliaçãoF1	000/35	< 0,20	50	Seco	< 0,05	Sem
10	FoliaçãoF1	200/30	< 0,20	40	Got	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,40	7	Got.	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,40	40	Got.	< 0,05	Sem
11	FoliaçãoF1	110/28	0,06	40	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	50/90	1	16	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	1	40	Seco	< 0,05	Sem

12	FoliaçãoF1	180/45	0,06	10	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,50	5	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,50	5	Seco	< 0,05	Sem
13	FoliaçãoF1	147/22	0,06	8	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	1	25	Seco	5	S V
	FraturaF3	130/90	1	8	Seco	5	S V
	FraturaF6	170/90	>2	25	Seco	2	S V
14	FoliaçãoF1	145/35	0,06	6	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,20	6	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,20	20	Seco	< 0,05	Sem
15	FoliaçãoF1	145/35	0,06	20	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,30	20	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,30	30	Seco	< 0,05	Sem
16	FoliaçãoF1	140/21	0,06	8	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,15	8	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,15	10	Seco	< 0,05	Sem
17	FoliaçãoF1	140/21	0,06	15	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	0,20	15	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	0,20	8	Seco	< 0,05	Sem
18	FoliaçãoF1	145/10	< 0,20	15	Úmido	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	1	12	Úmido	2	S V
	FraturaF3	130/90	1	15	Úmido	2	S V.
19	FoliaçãoF1	150/28	< 0,20	40	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	2	15	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	3	40	Seco	< 0,05	Sem
20	FoliaçãoF1	150/28	< 0,20	30	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF2	050/90	3	30	Seco	< 0,05	Sem
	FraturaF3	130/90	2	30	Seco	< 0,05	Sem

Obs.: Got. Indica Gotejamento e S V indica Solo Vegetal

5.3.2. Caracterização da Rocha Intacta

Na caracterização da rocha intacta foram observadas as propriedades de grau de alteração da rocha, coerência e resistência qualitativa. A classificação quanto ao estado de alteração foi elaborada de acordo com a Tabela 2.5, baseada nos graus de alteração verificados (Guidicini & Nieble, 1984).

Quanto ao grau de coerência, quantificou-se a resistência quanto à quebra do xisto ao golpe do martelo de acordo com os níveis descritos na Tabela 2.6

A partir da resistência ao impacto com martelo, utilizando-se dos procedimentos recomendados pela ISRM (1978), efetuou-se a classificação da rocha quanto à sua resistência, conforme as prescrições da Tabela 2.7. Os resultados estão sistematizados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Resistência à compressão uniaxial, coerência e grau de alteração por setor.

Setor	Campo de variação da resistência (MPa)	Grau de Coerência	Grau de Alteração	Grau de Resistência
1	5-25	C3	A2	R2
2	5-25	C3	A2	R2
3	5-25	C3	A2	R2
4	25-55	C2	A2	R3
5	5-25	C2	A3	R2
6	1-5	C4	A3	R1
7	1-5	C4	A2	R1
8	5-25	C3	A2	R2
9	5-25	C3	A2	R2
10	0,25-1	C4	A3	R0
11	5-25	C4	A3	R2
12	5-25	C4	A3	R2
13	5-25	C3	A2	R2
14	0,25-1	C4	A3	R0
15	0,25-1	C4	A3	R0
16	0,25-1	C4	A3	R0
17	0,25-1	C4	A3	R0
18	1-5	C4	A3	R1
19	5-25	C3	A2	R2
20	5-25	C3	A2	R2

5.4. AGRUPAMENTO DOS SETORES

Como as características dos setores são repetitivas em muitos deles, procedeu-se ao agrupamento dos setores com feições similares, de forma a facilitar a análise e descrição da encosta como um todo. Assim, os setores foram agrupados em três regiões na encosta, que foram tratadas de forma diferenciada.

5.4.1. Agrupamento I Setores 1 a 6

É representado pela zona de dobramento (charneira e flanco E) e caracterizado por escarpas subverticais (zonas de charneira) e vertentes (flancos). Ocorrem blocos rochosos semi-engastados no maciço ao longo de toda esta área da encosta, depósitos de tálus e blocos soltos de tamanho métricos a centímetricos nos trechos menos inclinados e deposição de sedimentos na base da encosta. Os mecanismos de instabilização observados são deslocamento de lascas, tombamento de blocos e erosões. Durante o período chuvoso, ocorrem inúmeras surgências de água nas fraturas (Figura 5.12).



Figura 5.12. Zona geotécnica do agrupamento I setores 1 a 6

5.4.2. Agrupamento II Setores 14 a 20

É representado pelas zonas situadas no topo da encosta. Estruturalmente é a zona de charneira da dobra. Apresenta foliação mergulhando 20-30° para Sul, sem ou com poucos afloramentos, devido à cobertura de solo silto-argiloso ou areno-siltoso e

revestimento vegetal. Não há sinais de instabilizações. Estes setores representam uma zona de recarga, área da encosta onde ocorre a alimentação superficial de águas por infiltração. Estas águas são concentradas ao longo das fraturas e tem como caminho preferencial a foliação (Figura 5.13).



Figura 5.13. Zona geotécnica do agrupamento II setores 14 a 20.

5.4.3. Agrupamento III Setores 7 a 13

É a zona perturbada pelo falhamento regional de direção EW. Apresenta foliação variando fortemente e dobramento do tipo “Kink bands”. As escarpas são altas (em torno de 15m, Figura 5.14). Ocorre um depósito de tálus em trecho menos íngreme e sedimentos fluviais na base da encosta, no leito do córrego Caquende. Verifica-se processos erosivos e de instabilização progressivos, além de blocos soltos na vertente e deslocamento de lascas rochosas do maciço. No setor 10 ocorre surgência de água em fratura com caráter perene.



Figura 5.14. Zona geotécnica do agrupamento III setores 7 a 13

5.5. LEVANTAMENTO GEOTÉCNICO

Após caracterizadas as discontinuidades e o material rochoso em campo, procedeu-se ao levantamento geotécnico de toda a área. Este levantamento possibilitou a análise dos processos potenciais, permitindo a definição qualitativa do comportamento do maciço mediante mecanismos de movimentos de massa. Usando-se uma matriz digitalizada de dados topográficos, executou-se a plotagem do mapa geotécnico (Anexo 4), classificando os processos de movimentos envolvidos em cada setor

(escorregamento translacional, em cunha, queda e rolamento de blocos, deslocamento de lascas rochosas, corrida de tálus, depósitos de sedimentos e processos combinados/complexos).

Definiu-se também em campo e representou-se no mapa geotécnico o estado de atividade das feições (ativa, inativa/latente e estabilizada) e o tipo de material envolvido (solo de cobertura, rocha, rocha/detritos, tálus e sedimentos fluviais). A base para a análise e descrição dos processos foram os mesmos setores estabelecidos para o estudo das discontinuidades. As informações sobre processos e estado de atividade na encosta do Morro do Curral estão representadas no mapa geotécnico (Anexo 4). A tabela 5.4 resume os processos, estados de atividade e materiais envolvidos em cada agrupamento.

Os processos verificados e analisados foram os seguintes:

- Escorregamentos translacionais ou planares, que mobilizam solos de cobertura, detritos, depósito de tálus e o xisto. São condicionados pela foliação e por um plano de fratura ou por dois planos de fratura que são desfavoráveis à estabilidade.
- Escorregamentos em cunha, que estão associados à existência de duas estruturas planares, desfavoráveis à estabilidade, que condicionam o deslocamento de um prisma de rocha ao longo do eixo de interseção destes planos.
- Queda de blocos, que mobiliza materiais rochosos que se descolam do maciço em movimento tipo queda livre, sendo geralmente provenientes das escarpas rochosas.
- Tombamento de blocos, condicionado pela presença das discontinuidades com grande mergulho.
- Deslocamento de lascas rochosas provenientes do maciço, em movimento do tipo queda livre ou por deslizamento ao longo de uma superfície inclinada.
- Corrida de tálus, associada a desestruturação do material mobilizado de escorregamentos anteriores na encosta.

Os estados de atividades foram definidos, conforme observações de campo, em:

1. Ativo, quando se percebe sinais de movimentos recentes;
2. inativo/latente, quando não se percebe movimentos, mas constata-se uma condição de instabilidade potencial;
3. estabilizado, quando não há movimentação recente e constata-se uma condição francamente estável do maciço.

Tabela 5.4. Caracterização geotécnica por agrupamento.

Agrupamentos	Processos de Movimento	Estado de atividade	Materiais envolvidos
I	Escorregamentos planar e em cunha, Queda e rolamento de blocos, corridas de tálus	Ativo	Rocha branda, blocos rochosos, lascas rochosas, detritos, tálus e solo de cobertura
II	Escorregamentos planar e em cunha, Queda e rolamento de blocos, corridas de tálus	Inativo/latente	Rocha branda, blocos rochosos, lascas rochosas, detritos e tálus.
III	Escorregamentos planar e em cunha, Queda e rolamento de blocos	Ativo/estabilizado	Manto vegetal, solo de cobertura, rocha branda, blocos rochosos e sedimentos fluviais

5.6. FOTOINTERPRETAÇÃO

Utilizando-se de um aparelho tipo Mirror Stereoscope MS27, equipado com Binoculares de 70mm, analisou-se vários conjuntos de fotos aéreas relativas aos anos de 1950, 1969, 1979 e 1986, como ferramenta de auxílio da identificação das estruturas presentes na encosta e da evolução do seu comportamento ao longo deste período. Este estudo também orientou o planejamento das campanhas de inspeção de campo e possibilitou o conhecimento da rede de drenagem natural.

Os aspectos observados em cada jogo de fotos são descritos a seguir:

- Nas fotos de 1950, (escala 1:25000), percebe-se a existência de cobertura vegetal em quase todos os setores, exceto os de número 11 e 12, onde constatou-se feições de deslizamento. Nota-se a conjugação das famílias de descontinuidades (fraturas) em toda a encosta e o falhamento regional que corta o setor 9 (feições claramente presentes em toda a seqüência dos estudos posteriores). Não existia o Bairro Vila São José.
- Nas fotos de 1969, (escala 1:10000), percebe-se cicatrizes de deslizamento nos setores 5, 9, 10, 11 e 12, e ausência de cobertura vegetal em todos os setores. Constata-

se a existência de novas habitações como os barracões da Ouro Minas e o prédio da Escola Estadual, bem como feições de deslizamentos.

c) Nas fotos de 1979, (escala 1:8000), já se observam feições de deslizamentos nos setores 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 e nova cobertura vegetal em todos os setores.

d) Nas fotos de 1986, (escala 1:30000), evidenciam-se novos processos de deslizamento nos setores 4, 5, 11, 12 e 13 e cobertura vegetal em todos os setores. Adicionalmente, são constatadas estruturas de contenção na encosta adjacente à empresa Ouro Minas, bem como reescalonamento e retaludamento nas áreas afetadas à Escola Estadual.

Numa análise geral, conclui-se que o uso e a ocupação do espaço no pé da encosta, acelerou os processos de movimentação de massa e a alternância da existência do revestimento vegetal revela o uso de técnicas inadequadas de renovação de pastagem e depósito de gado, o que facilitou a infiltração das águas nas zonas de recarga. Nota-se ainda o sistema de dobras e a conjugação das famílias de descontinuidades principais através das formas do relevo local.

ENSAIOS DE LABORATÓRIO

6.1. AMOSTRAGEM E PREPARAÇÃO

A coleta de amostras, visando a execução de ensaios de laboratório, para caracterização e determinação dos parâmetros de resistência do maciço rochoso, constituiu a etapa seguinte do processo de análise e avaliação da estabilidade da encosta do Morro do Curral. Nos procedimentos de campo, foram tomados cuidados especiais na retirada de amostras representativas do maciço, preservando as feições geológicas e estruturais preexistentes (Figura 6.1). Para a fase de coleta, foram selecionados previamente os setores 4, 6, 8, 14, 15, 16, 18 e 19, correspondentes às condições mais críticas da encosta (agrupamentos I e III).



Figura 6.1. Amostra representativa da encosta do Morro do Curral.

As amostras coletadas foram preparadas e moldadas para execução de ensaios convencionais e especiais no Laboratório de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Foram executados ensaios de caracterização física do afloramento rochoso e do solo de cobertura, de cisalhamento direto, de resistência à compressão puntiforme e de análise petrográfica que seguiram as recomendações adotadas pela ISRM – International Society for Rock Mechanics – Suggest Methods (1981). Os ensaios de cisalhamento direto sofreram adaptações devido a especificidade do maciço rochoso, tendo sido utilizadas as prescrições da norma americana D 3080/90, para ensaios de cisalhamento direto em amostra de solo, além de orientações específicas, fornecidas pelas normas e especificações da ABNT e ASTM.

Nos procedimentos de amostragem, foram utilizadas arco de serra, picareta, pá, martelo de geólogo e chibanca, evitando-se impactos e vibrações excessivas.

Devido às dificuldades de manuseio, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas com cuidado para o Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil da UFOP. Do material coletado, algo em torno de 180 Kg, foram perdidos cerca de 30% do total, em decorrência do manuseio nas operações de coleta e transporte.

Para a realização dos ensaios foram preparadas amostras do afloramento rochoso do xisto. Inicialmente, usou-se uma serra elétrica com disco diamantado para desbastar o grosso do material na formatação do corpo de prova, nas dimensões aproximadas de 10x10x2 cm (Figura 6.2). No ajuste fino para colocação no anel, valeu-se de lâminas de serra, facas de corte e lixas de baixa aspereza.



Figura 6.2. Corpo de prova do xisto para realização dos ensaios.

6.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios iniciais em laboratório buscaram a determinação dos índices físicos e caracterização geral do xisto da encosta. A partir de amostras indeformadas dos xistos cinza e marrom a avermelhado foram determinados a densidade dos grãos G (método do picnômetro), o peso específico saturado γ_{sat} , (o ensaio de saturação com superfície seca), o peso específico seco γ_d e a umidade de saturação (w), após a secagem da amostra saturada em estufa por 24 horas. Com base nos índices determinados nos ensaios, foram calculados as porosidades n e os índices de vazios e . (Tabela 6.1)

Tabela 6.1. Valores dos índices físicos das litologias da encosta do Morro do Curral.

Litologia	γ_{sat} (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	W (%)	n (%)	e	G
Xisto Cinza	23,01	20,83	10,32	21,82	0,27	2,91
Xisto marrom a avermelhado	23,19	21,32	8,82	18,78	0,23	2,98

Os resultados da tabela 6.1 demonstram pequenas diferenças entre as duas litologias do xisto, com o xisto marrom a avermelhado apresentando porosidade menor e maior densidade dos grãos. Os dados estão de acordo com as faixas típicas de variação destes parâmetros geotécnicos para os xistos da Formação Sabará.

6.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PUNTIFORME

O ensaio de índice puntiforme, usado para determinação da resistência à compressão ou tração de corpo de prova de rocha, é genericamente recomendado na literatura técnica (Reichmut, 1968; Broch & Franklin, 1972; Cornides, 1972; Guidicini e Nieble, 1976), por ser um ensaio simples e versátil, podendo ser operado tanto no campo quanto em laboratório.

Um esquema do equipamento e o princípio de funcionamento são ilustrados na Figura 6.3, e o aparelho utilizado nos ensaios na figura 6.4

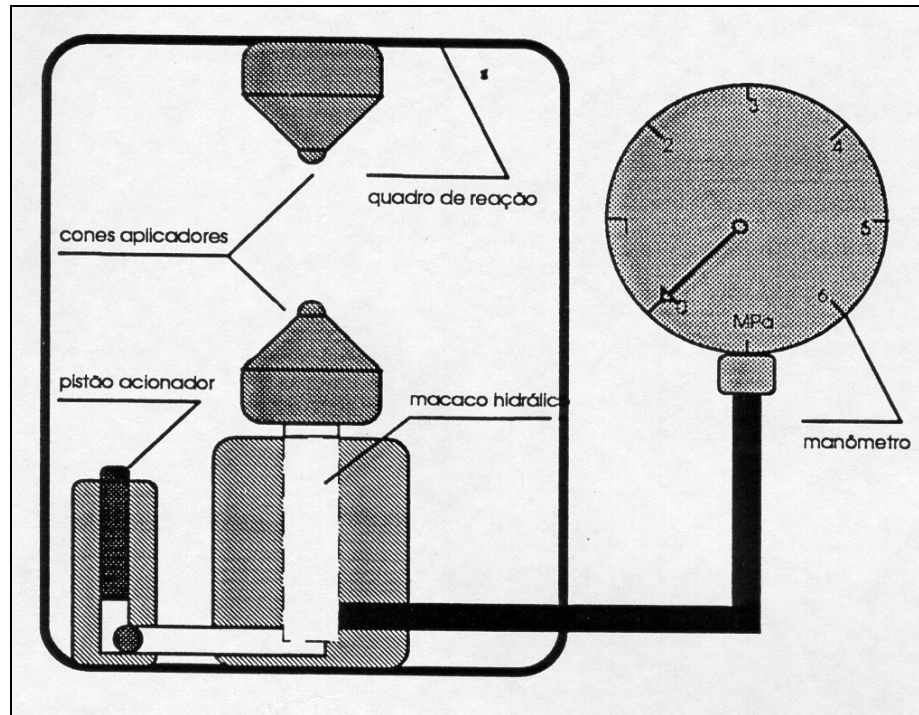


Figura 6.3. Esquema geral do ensaio de compressão puntiforme. (Hoek & Bray, 1981).

O ensaio consiste na determinação do valor de ruptura de uma carga puntiforme, aplicada por cones diametralmente opostos ao corpo de prova, determinando-se o chamado índice de resistência puntiforme (I_S). Esse parâmetro é a razão entre a força na ruptura e o quadrado do diâmetro da amostra. O $I_{S(50)}$ é o valor desse índice, normalizado para um corpo de prova com 50 mm de diâmetro.

De acordo com a ISRM (1985), os corpos de prova podem ser cilíndricos, testemunhos de sondagem ou mesmo irregulares, serrados ou não, com formato semelhante a prismas retangulares. O índice puntiforme $I_{S(50)}$, pode ser correlacionado quantitativamente com as resistências à compressão simples e à tração. Essas correlações indicam um valor da resistência à compressão simples da rocha variando entre 20 e 25 vezes o $I_{S(50)}$ e o da resistência à tração da ordem de 0,8 vezes o $I_{S(50)}$.

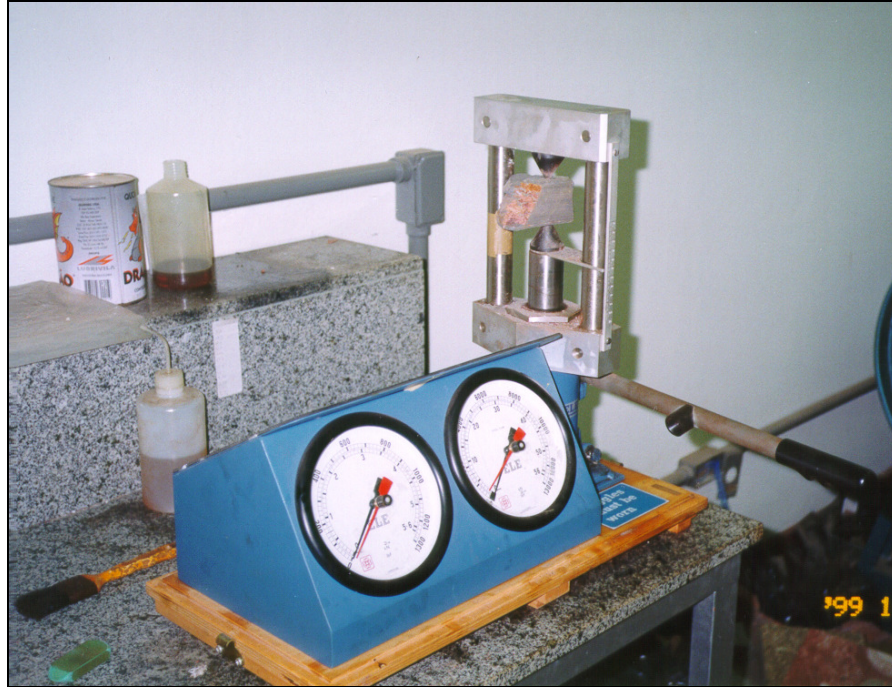


Figura 6.4. Aparelho portátil usado no ensaio de compressão puntiforme.

A relação entre os valores médios dos índices puntiforme obtidos nas direções perpendicular e paralela à foliação, respectivamente, constitui o chamado Índice Puntiforme de anisotropia (I_a) do material ensaiado (ISRM, 1972), ou seja:

$$I_a = \frac{I_{S(50,p)}}{I_{S(50,pp)}}$$

(6.1), onde:

I_a Índice puntiforme de anisotropia

$I_{S(50,p)}$: Índice puntiforme na direção perpendicular à foliação

$I_{S(50,pp)}$: Índice puntiforme na direção paralela à foliação

A Tabela 6.2 mostra os valores médios de 46 ensaios de índices puntiformes executados em amostras irregulares dos xistos da encosta do Morro do Curral, identificados por litologia e pela orientação em relação à foliação (paralela ou perpendicular). Foram executados 24 ensaios nos xistos cinza, sendo 13 ensaios na

orientação paralela à foliação e 11 ensaios na orientação perpendicular à foliação; nos xistos marrom a avermelhados, foram efetuados 22 ensaios, sendo 11 ensaios na orientação perpendicular à foliação e 11 ensaios na orientação paralela à foliação. O número de corpos de prova, utilizados para a correlação com as resistências à compressão estão de acordo com as prescrições da norma americana D5731/95 da ASTM e buscaram minimizar resultados tendenciosos, em conformidade com as recomendações relatadas por Broch (1983), ISRM (1985) e Grasso et al. (1992).

Tabela 6.2 Resultados dos ensaios de resistência à compressão puntiforme executados nos xistos da encosta do Morro do Curral.

Litologia	$I_{S(50,p)}$ (MPa)	σ (p) (MPa)	$I_{S(50,pp)}$ (MPa)	σ (pp) (MPa)	I_a $I_{S(50,p)} / I_{S(50,pp)}$
Xisto Cinza	0,15	3,45	0,041	0,94	3,66
Xisto Marrom ou amarelado	0,45	10,35	0,114	2,62	3,95

Obs: $I_{S(50,p)}$: Índice puntiforme na direção perpendicular à foliação

$I_{S(50,pp)}$: Índice puntiforme na direção paralela à foliação

Os resultados evidenciam valores de resistência a compressão característicos de rocha branda, classificada como rocha muito fraca (Hoek e Bray, 1981) ou extremamente fraca (Hoek et al., 1989). Os valores das resistências à compressão, tanto normal como paralelamente à xistosidade, apresentam-se muito próximos, estando um pouco acima dos valores apresentados por Rocha (1981). Os índices de anisotropia (I_a) obtidos são bastante elevados, mas dentro do padrão apresentado na literatura para rochas xistosas.

6.4. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

Nos ensaios de cisalhamento direto, foram realizadas duas campanhas de ensaios, tanto na direção paralela ao plano da foliação como na direção perpendicular ao plano de foliação. Tentou-se utilizar a norma americana D5607/95 para ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova rochosos, utilizando o aparelho portátil ilustrado na Figura 6.5, de acordo com a concepção original de Hoek e Bray, 1981.

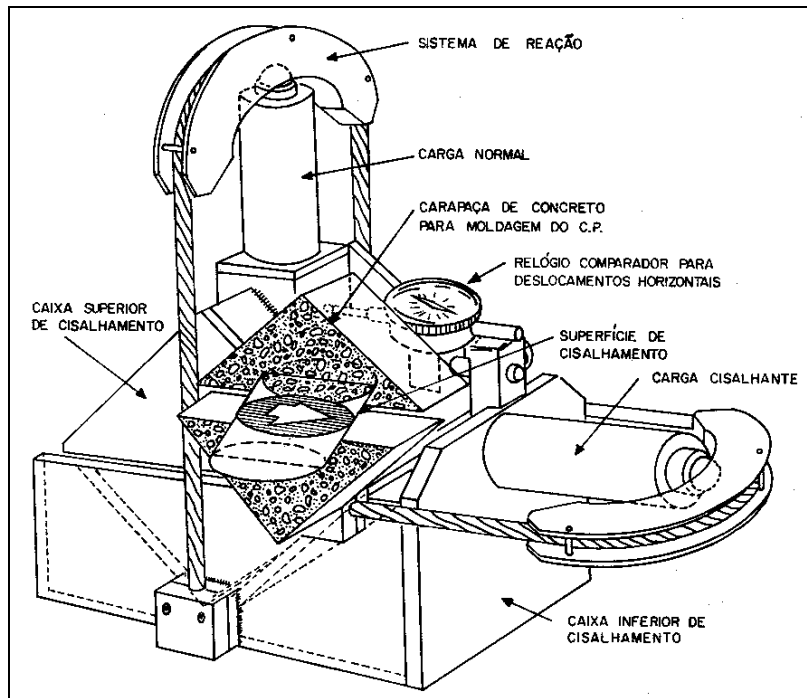


Figura 6.5. Arranjo Conjunto portátil para ensaio de cisalhamento direto em materiais rochosos.

Para um equipamento desse tipo, torna-se necessário que a amostra, contendo a descontinuidade a ser ensaiada, seja reduzida a dimensões de tal ordem a ser inserida nas caixas de ensaio, sendo a descontinuidade colocada na horizontal e alinhada com a direção de aplicação da carga cisalhante. Tal condição não foi possível com o xisto Sabará devido a fragilidade das amostras e dificuldades de moldagem do corpo de prova que deslocava em bandas, segundo a foliação e pulverizava-se em tamanhos milimétricos.

A solução encontrada foi utilizar os procedimentos da norma americana D3080/90, para ensaios de cisalhamento direto em amostra indeformada de solo. A moldagem dos corpos de prova foi executada em seção prismática, nas dimensões de 10 cm x 10 cm x 2 cm, (Figura 6.6) com um número muito grande de perda das amostras por deslocamento e pulverização ao manuseio.



Figura 6.6. Corpo de prova para ensaios de Cisalhamento Direto.

O aparelho utilizado foi uma prensa de cisalhamento convencional (Figura 6.7), com deslocamento da metade inferior da caixa em relação à superior a uma velocidade constante de deformação.

O procedimento consistiu em se aplicar cargas normais (N), através da colocação de pesos em um pendural simples, aplicando-se, em seguida, forças tangenciais (T) crescentes, induzindo o deslocamento de uma parte da caixa em relação à outra, até a ruptura sob uma velocidade de deformação constante do corpo de prova e igual a 0,8550 mm/s.



Figura 6.7. Prensa de Cisalhamento Direto usada na execução dos ensaios.

Realizou-se o ensaio para os estágios de aplicação de tensões normais iguais a: 20 kPa, 50 kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa e 400kPa, simulando em laboratório, a situação real da morfologia da encosta. Os ensaios foram realizados em baterias de três corpos de prova para cada estágio de aplicação de tensão normal, tanto para o xisto cinza como para o marrom a avermelhado. Após os ensaios, os dados foram digitados em uma planilha eletrônica, onde criaram-se tabelas com os resultados das tensões normal e cisalhante no plano de ruptura, respectivamente, $\sigma=N/A$ e $\tau=T/A$, onde A é a área da seção transversal do corpo de prova, sem correção. Os resultados foram plotados sob a forma de curvas tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais, deformações verticais x deslocamentos e tensões cisalhantes x tensões normais. Os parâmetros de resistência foram obtidos pelo critério de Moh-Coulomb, ajustado aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto para as condições de pico.

A Tabela 6.3 sistematiza os resultados dos ensaios realizados, nos xistos da encosta do Morro do Curral, na direção paralela à foliação, indicando os valores de tensão normal, de cisalhamento na ruptura, os ângulos de atrito e os interceptos de coesão.

Tabela 6.3 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na direção paralela à foliação.

Litologia	Xisto Cinza				Xisto Marrom a avermelhado			
Nível de Tensão	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
			30	46,3	20	85,13	54	23,1
	50	85,66			50	95,63		
	100	91,97			100	275,80		
	150	135,98			150	292,09		
	200	161,76			200	359,09		
	400	281,47			400	614,01		

Dos 72 corpos de prova moldados e ensaiados, somente em 48 o plano de ruptura, foi verificado ser paralelo ao plano de foliação, isto é, constatou-se realmente uma ruptura clara durante o estágio de carregamento do ensaio, com delineação de uma superfície de ruptura contínua, única e exclusiva no corpo de prova, com separação das bandas do xisto e sem destruição dos grãos ou das crenulações (Figura 6.8). Nos outros ensaios, o plano de ruptura foi descontínuo, sem uma distinção clara da superfície de ruptura devido às fragmentações da amostra, pelo que foram desconsiderados nas análises.



Figura 6.8. Tipos de ruptura observados nos corpos de prova.

Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados na Tabela 6.3 estão de acordo com dados da literatura técnica, para planos paralelos à xistosidade (Rocha, 1981; Hoek, 1972).

A Tabela 6.4 apresenta os resultados dos ensaios realizados, nos xistos da encosta do Morro do Curral, na direção perpendicular à foliação, indicando os valores de tensão normal, de cisalhamento na ruptura, os ângulos de atrito e os interceptos de coesão.

Tabela 6.4 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados na direção perpendicular à foliação.

Litologia	Xisto Cinza				Xisto Marrom a avermelhado			
Nível de Tensão	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Coesão (kPa)
			69	72	20	255,13	69,8	45
	50	188,93			50	272,16		
	100	322,56			100	722,30		
	150	463,10			150	1008,00		
	200	635,90			200	1125,94		
	400	1099,15			400	1361,81		

Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento apresentados na Tabela 6.4. estão algo acima dos valores de referência na literatura técnica, para planos perpendiculares à xistosidade (Rocha, 1981; Hoek, 1972).

6.5. ENSAIOS DE ANÁLISE PETROGRÁFICA

Nas análises petrográficas, foram preparadas lâminas em seções delgadas, objetivando a identificação litológica, informações sobre composição mineralógica, granulação, texturas e disposição das estruturas das rochas. As lâminas delgadas foram obtidas através de equipamento de corte em rocha, constituído de disco diamantado, para cortar superfícies planas, formando um paralelogramo que foi desgastado por rebolo plano, placa de vidro e abrasivo de granulação progressiva. As amostras foram examinadas microscopicamente através de um microscópio óptico de luz polarizada.

O estudo petrográfico dos xistos cinza e marrom a avermelhado em seções delgadas permitiu estabelecer as seguintes descrições gerais:

O xisto cinza apresentou-se como uma rocha holocristalina inequigranular porfiroblástica, com matriz granoblástica, muito fina, às vezes poligonal e lepdoblástica.

O quartzo apresenta-se sob a forma estirada, devido ao processo de recristalização, às vezes formando pequenos agregados poligonais e apresentando evidências de formação de subgrãos. O tamanho é fino chegando a 0.025 mm. A moscovita é fina, lepdoblástica e define a foliação da rocha. Este mineral encontra-se distribuído homogeneamente na lâmina. Já o feldspato apresenta-se de forma xenoblástica, fino, só sendo possível de diferenciar do quartzo pelas figuras de interferência.

Além desta associação mineralógica básica, a rocha apresenta-se com uma poeira opaca, às vezes oxidada, aparentemente envolvendo os grãos de quartzo. O mineral porfiroblástico, não foi possível de ser identificado devido ao seu grau de intemperismo. Provavelmente, pelo grau metamórfico da rocha, trata-se de um cloritóide. Estes cristais estão perturbando a foliação da rocha, sendo que, em algumas seções, mostram evidências de rotação.

Por outro lado, a amostra do xisto marrom a avermelhado apresentou-se como uma rocha holocristalina porfiroblástica, com matriz equigranular granoblástica poligonal e lepdoblástica, sendo composta por quartzo, muscovita, feldspato (pouco) e um porfiroblasto intemperizado (provavelmente cloritóide).

O quartzo é granoblástico poligonal e a moscovita lepdoblástica, ambos finos. O feldspato é fino xenomorfo, muito parecido com o quartzo.

A lâmina exibiu uma variação composicional, onde há uma “camada” de composição diferente do restante. Nesta camada encontram-se porfiroblastos de quartzo e o tamanho dos cristais chega a 0.068 mm.

Constata-se, assim, que o xisto cinza apresenta menos porfiroblastos que o xisto marrom a avermelhado. Uma outra diferença importante é que no xisto cinza a foliação é mais penetrativa, a granulometria é muito fina e a mica encontra-se distribuída homogeneamente na lâmina, resultando em uma rocha mais homogênea. (Figura 6.9)

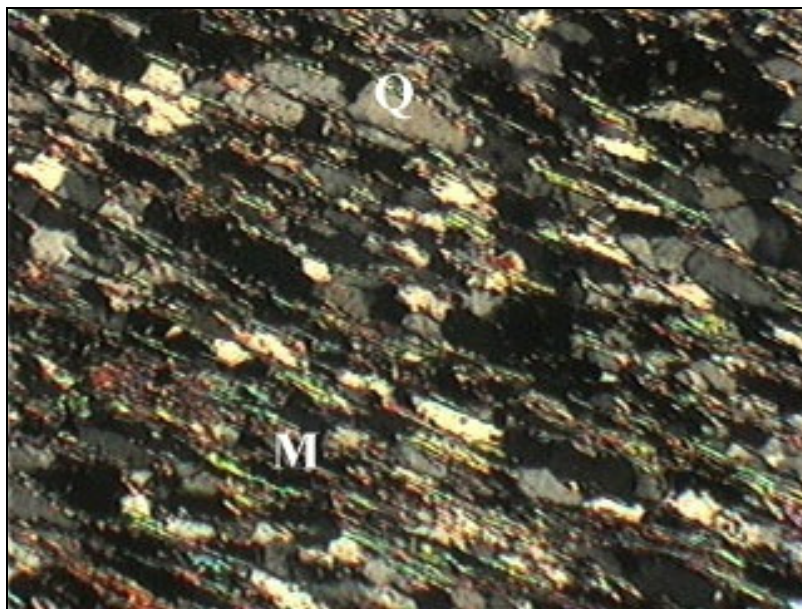


Figura 6.9. Lâmina petrográfica do xisto cinza.
Obs: base da fotografia 1.1 mm, (Q – quartzo, M – moscovita)

Já no xisto marrom a avermelhado, a granulometria é um pouco mais grossa, a foliação não é tão penetrativa e, além disso, a presença de porfiroblastos é mais freqüente, ocorrendo até mesmo camadas sem a presença da moscovita. Portanto, a rocha apresenta uma distribuição heterogênea dos seus constituintes, chegando a ter camadas com quartzo e o porfiroblasto (cloritóide) sem moscovita.

Estes fatores podem influenciar o comportamento das rochas ao cisalhamento, pois no xisto cinza a mica (mineral que tem uma ótima direção de clivagem) está distribuída em “planos contínuos” (foliação penetrativa) e homogeneamente na rocha, enquanto que, no xisto marrom a avermelhado, a feição descrita anteriormente não é observada, tendo distribuição heterogênea e granulometria mais grossa que o xisto cinza. (Figura 6.10)

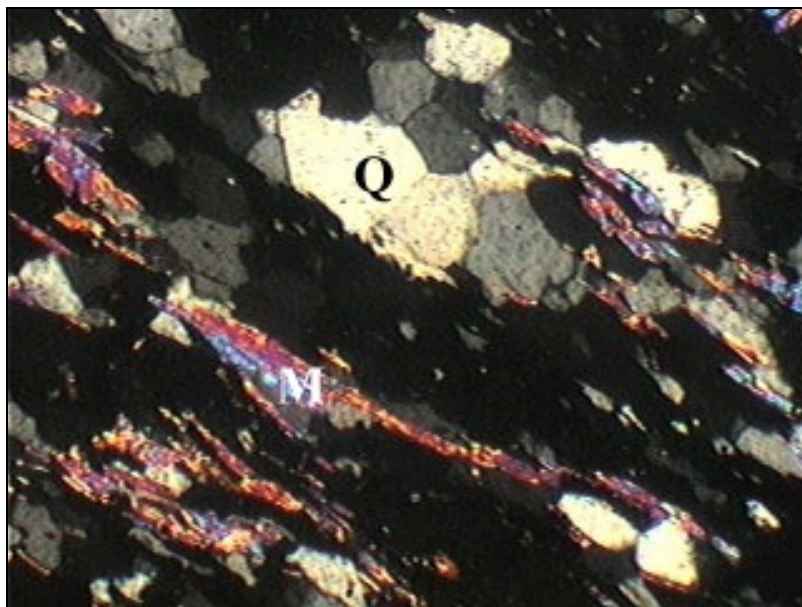


Figura 6.10. Lâmina petrográfica do xisto marrom a avermelhado
Obs: base da fotografia 1.1 mm, (Q – quartzo, M – moscovita)

6.6. SOLOS SUPERFICIAIS

Foram realizados ensaios de caracterização física do solo de cobertura, que seguiram os procedimentos recomendados pela ABNT, através de normas específicas para cada ensaio.

As amostras para execução destes ensaios foram obtidas nos setores da encosta com ocorrência de solo de recobrimento, de acordo com as prescrições da norma brasileira NBR 6502/80 e a preparação das amostras foi realizada em conformidade com a norma brasileira NBR 6457/80. Análises granulométricas por peneiramento e sedimentação foram realizadas (NBR 7181/84), com quarteamento do material, e homogeneização do solo.

Adicionalmente, foram realizados ensaios para determinação dos limites de consistência (limites de liquidez, LL e de plasticidade, LP) e da densidade dos grãos, utilizando os procedimentos convencionalmente estabelecidos por normas específicas da ABNT. A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos na caracterização dos solos superficiais da encosta do Morro do Curral.

Tabela 6.5 Caracterização do solo de cobertura da encosta do Morro do Curral.

Material	Classificação NBR 6502/95	LL %	LP %	w %	n %	e	γ_d kN/m ³	G
Solo Cinza	Areno-Siltoso	NP	NP	14,19	48,65	0,94	13,3	2,59
Solo Marrom	Silte argiloso	60,63	36,64	43,67	58,24	1,39	11,4	2,73

Obs: NP: “não plástico”

CAPÍTULO 7

APLICAÇÃO DOS SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA E PARÂMETROS DE PROJETO

7.1. APLICAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS

Com a finalidade de se obter os índices característicos de qualidade do maciço, associados ao modelo geomecânico proposto para o projeto de engenharia para contenção da encosta, foram utilizados os sistemas de classificação geomecânicos previamente descritos (cap.2), baseados na quantificação de parâmetros que caracterizam os materiais rochosos e as suas descontinuidades.

7.1.1. Classificação de BIENIAWSKI (1989) – Sistema RMR

A aplicação desta classificação foi realizada a partir dos levantamentos de campo e ensaios de laboratório. Das inspeções, foram definidas as famílias de descontinuidades mais importantes, e incluindo-se a frequência, obter-se a média dos parâmetros por família e por setor.

O parâmetro 1 (resistência da rocha intacta) foi determinado com base nos ensaios do índice de compressão puntiforme feitos em amostras coletadas em pontos representativos. Como não se coletou amostras para cada setor, e sim, nos mais representativos, adotou-se, para efeito de quantificação local do maciço, o valor médio do índice de compressão puntiforme do xisto ensaiado mais próximo de cada setor.

Para o parâmetro 2 (índice de qualidade da rocha – *RQD*: (“rock quality designation”), como não se dispunha de testemunhos de sondagem, foi usada a proposta de Palmstrom (1975), que relacionou o *RQD* com o número de descontinuidades do setor por metro cúbico através das equações:

$$RQD = 115 - 3,3J_v \quad (7.1)$$

$$J_v = \sum \frac{1}{S_i} \quad (7.2)$$

Sendo S_i o espaçamento médio das descontinuidades da família i , em metros.

Aplicou-se ainda a proposta de Priest e Hudson (1976), que correlaciona o RQD com o espaçamento das descontinuidades através da equação:

$$RQD = 110.e^{-0,1/S} [(0,1/S) + 1] \quad (7.3)$$

Sendo S o espaçamento médio das descontinuidades, em metros.

Para o parâmetro 3 (espaçamento das descontinuidades), foram consideradas as médias para cada família de descontinuidade de cada setor.

O parâmetro 4 (padrão das descontinuidades), que envolve características de abertura, persistência, rugosidade, alteração das paredes e condições do material de preenchimento de cada setor, foi quantificado pela média das grandezas analisadas.

Para o parâmetro 5 (influência da água subterrânea), utilizou-se a observação visual, durante o ano, principalmente no período chuvoso, considerando o estado seco, úmido, transpiração, gotejamento, filete e jorro.

Em relação ao parâmetro 6 (orientação das descontinuidades com relação aos taludes por setor), foram feitos ajustes de forma a se obter a direção mais adequada para cada setor, já que se trata de uma encosta natural com taludes variáveis. A direção das descontinuidades foram consideradas, em relação ao eixo dos taludes, como perpendicular, paralela ou qualquer, sendo o mergulho descrito como favorável ou desfavorável.

Após a atribuição de pesos, em função dos níveis de variação dos parâmetros estudados, o maciço rochoso da encosta foi geomecanicamente definido nos 20 setores previamente estabelecidos (Tabela 7.1).

O índice global RMR da classificação de Bieniawski é obtido pelo somatório dos seis parâmetros apresentados na Tabela 7.1, o qual é correlacionado, então, com cinco classes diferentes que identificam o padrão geomecânico do setor analisado. Estes resultados, para a encosta do Morro do Curral, estão sistematizados na Tabela 7.2. Adicionalmente, são apresentados valores estimados para os parâmetros de resistência da rocha, com base na qualidade geomecânica prevista para cada setor do maciço.

Tabela 7.1. Ponderação dos parâmetros do sistema RMR de Bieniawski (1989) para a encosta estudada.

Setor	σ (Valor estimado)		<i>RQD</i>		Espaçamento		Padrão das Descontinuidades	Ação da água	Orientação da Descontinuidade
	Valor (MPa)	Peso	Valor	Peso	Valor (m)	Peso			
1	5,0-25	2	94,78	20	3,05	20	0	15	-25
2	5,0-25	2	36,55	8	1,68	15	0	15	-50
3	5,0-25	2	38,27	8	1,81	15	0	15	-50
4	25-50	4	86,39	17	1,625	15	10	15	-25
5	5,0-25	2	49,81	8	3,39	20	0	15	-60
6	1,0-5,0	1	56,14	13	1,19	15	20	7	-5
7	1,0-5,0	1	56,15	13	1,19	15	20	7	-25
8	5,0-25	2	56,16	13	2,02	20	0	7	-25
9	5,0-25	2	50,65	13	1,41	15	0	15	-25
10	0,25-1,0	0	43,49	8	0,286	10	20	4	-25
11	5,0-25	2	36,89	8	0,565	10	0	15	-25
12	55,0-25	2	46,80	8	0,353	10	20	15	-25
13	5,0-25	2	51,75	13	1,02	115	0	15	-25
14	0,25-1,0	0	26,99	8	0,153	8	20	15	-25
15	0,25-1,0	0	38,00	8	0,220	10	20	15	-25
16	0,25-1,0	0	15,09	5	0,120	8	20	15	-25
17	0,25-1,0	0	27,00	8	0,153	8	20	15	-25
18	1,0-5,0	1	53,40	13	0,686	15	0	15	-5
19	5,0-25	2	57,75	13	1,686	15	25	15	-25
20	5,0-25	2	57,75	13	1,686	15	25	15	-25

Tabela 7.2. Classificação do maciço pela da aplicação do sistema RMR de Bieniawski (1989).

Setor	RMR	Classe	Coesão (KPa)	Ângulo de Atrito
1	32	IV	180-200	15-25
2	-10	V	<100	<15
3	-10	V	<100	<15
4	36	IV	100-200	15-25
5	-15	V	<100	<15
6	51	III	200-300	25-35
7	31	IV	100-200	15-25
8	17	V	<100	<15
9	20	V	<100	<15
10	17	V	<100	<15
11	10	V	<100	<15
12	30	IV	100-200	15-25
13	20	V	<100	<15
14	26	IV	100-200	15-25
15	28	IV	100-200	15-25
16	23	IV	100-200	15-25
17	26	IV	100-200	15-25
18	31	IV	100-200	15-25
19	45	III	200-300	25-35
20	45	III	200-300	25-35

Classe III: Regular; Classe IV: Ruim; Classe V: Muito ruim.

7.1.2. Classificação de ROMANA (1985) – Sistema SMR

O sistema SMR (“Slope Mass Rating”) foi proposto por Romana para a classificação de taludes, a partir do índice RMR ajustado. Este ajuste é feito através de

dois fatores, um fator que é função da orientação das descontinuidades, sendo o resultado de um produto de três subfatores e o outro fator, que é função do método de escavação utilizado, tal que:

$$SMR = RMR + (F_1.F_2.F_3) + F_4, \text{ sendo:} \quad (7.4)$$

F_1 : Fator que incorpora as análises entre o paralelismo existente entre o rumo de mergulho das descontinuidades e da face do talude, caracterizado como muito favorável, favorável, normal, desfavorável ou muito desfavorável (valores variando entre 1,00 e 0,15 considerando as rupturas planar e por tombamento);

F_2 : Fator que depende do mergulho das descontinuidades e quantifica a resistência ao cisalhamento da rocha, com valores entre 1,00 e 0,15, considerando as rupturas planar e por tombamento;

F_3 : Fator que pondera as relações entre os ângulos de mergulho da descontinuidade e do talude, considerando rupturas planar e por tombamento;

F_4 : Fator relativo ao método de escavação, com valor adotado igual a +15, pela situação de tratar-se de um talude natural.

A Tabela 7.3, apresenta as orientações das famílias de descontinuidades mais relevantes e os valores dos parâmetros associados à classificação de Romana (1985).

Tabela 7.3. Valores dos Parâmetros do Sistema SMR de Romana (1985).

Setor	RMR	Família Crítica	F_1	F_2	F_3	F_1, F_2, F_3	F_4
1	32	85/50	0,64	1,00	-60	-38,40	15
2	-10	70/78	0,56	1,00	-60	-33,60	15
3	-10	80/58	0,78	1,00	-60	-46,80	15
4	36	70/36	0,56	0,85	-60	-28,56	15
5	-15	90/54	0,34	1,00	-6	2,05	15
6	51	140/25	0,70	0,40	-60	-16,80	15
7	31	175/7	0,85	0,15	-60	-7,65	15
8	17	175/7	0,40	0,15	-60	-3,60	15
9	20	160/7	0,70	0,15	-60	-6,30	15
10	17	200/30	0,69	0,40	-60	-16,78	15
11	10	110/28	0,23	0,40	-50	-4,68	15
12	30	180/45	0,35	0,85	-50	-15,17	15
13	20	147/22	0,63	0,40	-60	-15,09	15
14	26	145/35	0,40	0,70	-50	-14,00	15
15	28	145/35	0,70	-50	-24,50	15	15
16	23	140/21	1,00	0,40	-60	-24,00	15
17	26	140/21	0,70	0,40	-60	-16,80	15
18	31	145/10	0,93	0,15	-60	-8,33	15
19	45	150/28	0,85	0,28	-60	-14,28	15
20	45	150/28	0,84	0,28	-60	-14,11	15

A Tabela 7.4 apresenta a caracterização geomecânica de cada setor do maciço estudado pela classificação de Romana (1985), com base nos valores calculados de SMR.

Tabela 7.4. Classificação do maciço pelo sistema SMR de Romana (1985).

Setor	SMR	Classe	Condição de Estabilidade	Condição de Ruptura
1	9	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
2	-29	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
3	-42	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
4	22	IV	Instável	Grandes Cunhas
5	-2	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
6	49	III	Estável	Muitas Cunhas
7	38	IV	Instável	Grandes Cunhas
8	28	IV	Instável	Grandes Cunhas
9	29	IV	Instável	Grandes Cunhas
10	15	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
11	20	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
12	29	IV	Instável	Grandes Cunhas
13	19	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
14	27	IV	Instável	Grandes Cunhas
15	18	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
16	14	V	Totalmente Instável	Grandes Rupturas
17	24	IV	Instável	Grandes Cunhas
18	38	IV	Instável	Grandes Cunhas
19	46	III	Normal	Muitas Cunhas
20	46	III	Normal	Muitas Cunhas

Classe III: Normal; Classe IV: Ruim; Classe V: Muito ruim.

7.1.3. Classificação de BARTON et al. (1974) – Sistema Q

O sistema Q de classificação geomecânica é baseado na avaliação da qualidade do maciço rochoso, onde adotou-se a média dos parâmetros por família de descontinuidade para cada setor, dado pela equação:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (7.5),$$

sendo:

RQD: índice de qualidade de rocha, quantificado por setor, pelo mesmo critério adotado na classificação de Bieniawski;

J_n: índice relativo ao número de famílias de descontinuidades presentes;

J_r: índice de aspereza das descontinuidades;

J_a: índice de alteração das descontinuidades; os parâmetros *J_r* e *J_a* foram quantificados com valores relativos à condição mínima favorável;

J_w: fator de redução devido à água; analisado com base em observações visuais, durante o ano, principalmente no período chuvoso;

SRF: fator de redução devido às condições das tensões no maciço ou à presença de zonas de cisalhamento; como não se dispunha de valores de tensões in situ na encosta, optou-se por adotar valores para a condição de descontinuidades abertas e soltas, para rochas intensamente fraturadas (valor igual a 5).

A Tabela 7.5 apresenta os índices quantitativos do sistema de classificação geomecânica de Barton et al. (1974) e a Tabela 7.6 fornece os resultados gerais da classificação geomecânica do maciço analisado.

Tabela 7.5. Parâmetros do Sistema Q de Barton et al. (1974).

Setor	RQD	J _n	J _r	J _a	J _w	SRF
1	94,78	15,0	4,0	4,0	1,0	5,0
2	36,35	15,0	4,0	5,0	1,0	5,0
3	38,27	15,0	1,0	1,0	5,0	5,0
4	86,39	12,0	3,0	4,0	1,0	5,0
5	49,82	15,0	3,0	4,0	1,0	5,0
6	56,14	9,0	3,0	2,0	0,66	5,0
7	56,15	15,0	1,5	2,0	0,66	5,0
8	56,16	15,0	3,0	4,0	0,66	5,0
9	50,65	15,0	1,0	8,0	1,0	5,0
10	43,49	9,0	1,5	2,0	0,5	5,0
11	36,89	9,0	3,0	4,0	1,0	5,0
12	46,80	9,0	4,0	2,0	1,0	5,0
13	51,75	15,0	3,0	4,0	1,0	5,0
14	26,99	6,0	3,0	4,0	1,0	5,0
15	38,00	6,0	4,0	4,0	1,0	5,0
16	15,99	6,0	4,0	2,0	1,0	5,0
17	27,00	6,0	4,0	2,0	1,0	5,0
18	53,40	6,0	4,0	4,0	0,66	5,0
19	57,25	6,0	4,0	3,0	1,0	5,0
20	57,25	6,0	4,0	2,0	1,0	5,0

Tabela 7.6. Classificação do maciço pelo sistema Q de Barton et al. (1974).

Setor	Q	Classe do Maciço
1	1,263	Ruim
2	0,387	Muito Ruim
3	0,102	Muito Ruim
4	1,079	Ruim
5	0,491	Muito Ruim
6	1,235	Ruim
7	0,370	Muito Ruim
8	0,371	Muito Ruim
9	0,084	Extremamente Ruim
10	0,362	Muito Ruim
11	0,615	Muito Ruim
12	2,08	Ruim
13	0,518	Muito Ruim
14	0,675	Muito Ruim
15	1,266	Ruim
16	1,066	Ruim
17	1,80	Ruim
18	1,18	Ruim
19	2,543	Ruim
20	3,816	Ruim

7.1.4. Considerações sobre a Aplicação das Classificações

Os índices geomecânicos visam estabelecer a qualidade geomecânica dos maciços rochosos, permitindo correlações com parâmetros de resistência, que são de capital importância para o projeto de engenharia de contenção da encosta. As correlações são uma forma de se verificar os resultados dos ensaios in situ, que, por sua vez, servem de referência para a verificação da adequabilidade das equações empíricas.

Os resultados obtidos pela classificação de Bieniawski (1989) indicam três classes de maciço: regular, ruim e muito ruim, o que caracteriza um maciço de qualidade regular bastante compatível com o que se observa no campo. Pela

classificação de Romana (1985), o maciço foi avaliado como muito ruim, ruim e normal, exigindo processos de tratamento da encosta.

De acordo com os resultados compilados da aplicação da classificação de Barton et al (1974), o maciço foi subdivididos nas classes ruim, muito ruim ou extremamente ruim, o que qualifica o maciço como apresentando sérios problemas de instabilização, essencialmente vinculado ao grau de alteração apresentado pela rocha no campo.

Os ângulos de atrito estimados a partir do sistema RMR estão na faixa de 25 a 35° para os setores 20, 19 e 6. Para os setores 18, 17, 16, 15, 14, 12, 7, 4 e 1 estão na faixa de 15 a 25° e para os setores 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11 e 13 os valores estimados são inferiores a 15°.

No cálculo do RQD, os valores foram superiores a 75%, equivalentes a um maciço de boa qualidade. Esta condição não corresponde às características observadas no campo, relativas a um maciço bastante alterado, com instabilização em placas segundo planos paralelos à xistosidade.

A Tabela 7.7 sistematiza os indicadores geomecânicos obtidos pela aplicação das três classificações utilizadas.

Tabela 7.7 Comparação entre os resultados da aplicação dos sistemas de classificação geomecânica.

Sector	RMR	SMR	Q
1	32	9	1,263
2	-10	-29	0,387
3	-10	-42	0,102
4	36	22	1,079
5	-15	-2	0,491
6	51	49	1,235
7	31	38	0,370
8	17	28	0,371
9	20	29	0,084
10	17	15	0,362
11	10	20	0,615
12	30	29	2,08
13	20	19	0,518
14	26	27	0,675
15	28	18	1,266
16	23	14	1,066
17	26	24	1,800
18	31	38	1,180
19	45	46	2,543
20	45	46	3,816

De modo geral, os resultados não foram muito dispersos, já que os mesmos estão praticamente todos incluídos nas mesmas classes de maciço nos três sistemas geomecânicos utilizados.

As eventuais diferenças entre os valores obtidos de RMR, SMR e Q, particularmente nos setores 6, 19 e 20, ocorreram devido aos parâmetros relativos ao número de famílias de descontinuidades, atitudes preferenciais, abertura, espaçamento e preenchimento das descontinuidades, já que os parâmetros relativos à influência de água, estado de tensões no maciço e RQD apresentaram menor variação.

A partir dos dados da tabela 7.7, plotou-se o mapa de padrões geomecânicos da encosta, subdivididas em três classes gerais de comportamento geomecânico (Anexo 5)

7.1.5. Correlações para Obtenção do Módulo de Deformabilidade

Para o projeto de contenção da encosta, torna-se importante o conhecimento do módulo de deformabilidade, pelo que o mesmo foi estimado pela equação de Serafim & Pereira (1983):

$$E = 10^{(RMR-10) / 40} \quad (\text{em GPa}) \quad (7.6)$$

Os valores dos módulos de deformabilidade, correlacionados aos valores de RMR para todos os setores, estão dados na Tabela 7.8.

Tabela 7.8 Módulos de Deformabilidade da rocha por setor geomecânico do maciço analisado.

Setor	RMR	Módulo de deformabilidade (GPa)
1	32	3,548
2	-10	0,316
3	-10	0,316
4	36	4,466
5	-15	0,237
6	51	10,592
7	31	3,349
8	17	1,496
9	20	1,778
10	17	1,496
11	10	1,000
12	30	3,162
13	20	1,778
14	26	2,511
15	28	2,818
16	23	2,113
17	26	2,511
18	31	3,349
19	45	7,498
20	45	7,498

7.2. PARÂMETROS DE PROJETO

O modelo geomecânico, com as características globais do maciço da encosta do Morro do Curral, foi definido após os trabalhos de campo, ensaios de laboratório e classificação com os três sistemas selecionados. Os parâmetros geomecânicos adotados para o projeto de estabilização estão sistematizados na Tabela 7.9

Tabela 7.9. Parâmetros Geomecânicos do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral.

SMR	Descrição	Maciço rochoso						
		I _{S50p} (MPa)	I _{S50pp} (MPa)	I _a	σ (MPa)	C (KPa)	φ (°)	E (GPa)
46	Xisto cinza	0,157	0,041	3,85	0,943	46,3	30	7,498
zona I	Xisto marrom	0,457	0,114	4,00	2,620	23,1	54	
22	Xisto cinza	0,157	0,041	3,85	0,943	100-200	15-25	4,466
zona II	Xisto marrom	0,457	0,114	4,00	2,620	100-200	15-25	
-2	Xisto cinza	0,157	0,041	3,85	0,943	< 100	<15	0,237
zona III	Xisto marrom	0,457	0,114	4,00	2,620	< 100	<15	

O modelo caracteriza um maciço rochoso, medianamente homogêneo de constituição xistosa, com intenso processo de alteração superficial. O maciço apresenta-se com um comportamento geomecânico normal, passando localmente a ruim e muito ruim, em áreas que exigem tratamento com relação à estabilidade. O modelo demarcou 3 zonas potenciais de ruptura e delimitou faixas parcialmente estáveis, instáveis e totalmente instáveis, dependendo das atitudes das famílias de descontinuidades. Adicionalmente o maciço apresenta um elevado índice de anisotropia, quantificado pelo índice I_a.

CAPÍTULO 8

ANÁLISES CINEMÁTICAS E CARACTERIZAÇÃO DOS MECANISMOS DE RUPTURA

A análise cinemática na encosta e caracterização das rupturas restringiu-se ao agrupamento I, zona mais crítica do talude, que é subdividido em seis setores distintos (S1 a S6).

De posse dos levantamentos de campo, que correspondem às superfícies de descontinuidades identificadas, executou-se os diagramas de frequência correspondentes, determinando-se o grande círculo que representa o plano referente ao centro da concentração de pólos. Este plano representa a atitude predominante da estrutura em estudo.

Nos setores em que foram coletadas amostras, o ângulo de atrito foi obtido com base nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e nos demais setores, este parâmetro foi inferido a partir das classificações geomecânicas.

O agrupamento II, representado pelas zonas situadas no topo da encosta, constitui-se da zona de charneira da dobra e não há sinais de instabilizações.

O agrupamento III é a zona perturbada pelo falhamento regional e apresenta sinais de instabilização progressiva, mas se encontra numa área que não representa risco imediato ao Centro de Arte e Convencões de Ouro Preto.

8.1. ATITUDE DAS SUPERFÍCIES DE DESCONTINUIDADES

A atitude preferencial das descontinuidades pode ser verificada pelos diagramas de frequência elaborados (Figuras 8.1 e 8.2).

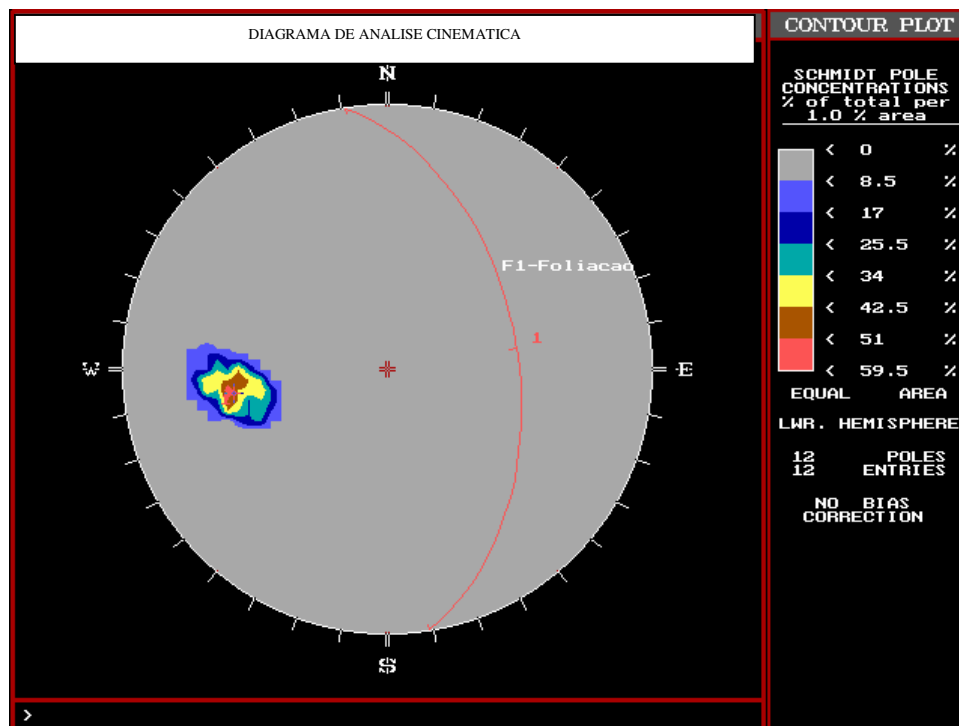


Figura 8.1. Diagrama de frequências correspondentes as superfícies de descontinuidades (foliação) do agrupamento I – setores (1 a 6).

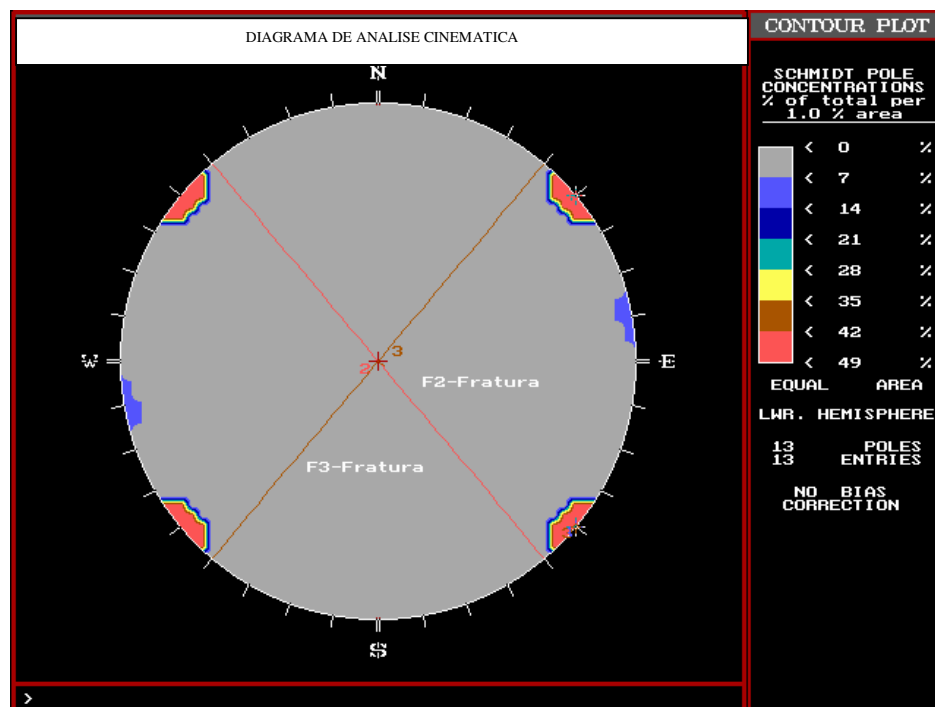


Figura 8.2 – Diagrama de frequências correspondentes às superfícies de famílias de descontinuidades (fraturas) do agrupamento I – setores (1 a 6).

As principais descontinuidades, representativas do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral, são as seguintes:

- Foliação F1: 095/41
- Família de fraturas F2: 050/90
- Família de fraturas F3: 130/90
- Família de fraturas F4: 080/90: presente apenas no setor S5.

A seguir, são analisados os setores individualizados do Agrupamento I e os resultados das análises cinemáticas (Figuras 8.3 a 8.8) são processadas, segundo o método desenvolvido por Markland (1972), de acordo com a recomendação de Hoek & Bray (1981).

8.2. SETOR 1

Para o estudo de análise cinemática no setor 1 (Figura 8.3), foram consideradas as escarpas E1 (020/90), E2 (078/90) e a vertente V1 (095/45), que representam a superfície da encosta. No mesmo estereograma, foram plotadas as superfícies representativas, foliação F1 (095/41), fratura F2 (050/90) e a fratura F3 (130/90). Considerando que o deslocamento somente pode ocorrer como resultado da movimentação na direção da face livre da encosta, é necessário identificar o tipo de ruptura potencial que pode ocorrer, com relação à mesma.

Considerou-se o valor de 20° (média dos valores obtidos a partir do índice RMR) para o ângulo de atrito, na execução do teste de Markland.

A análise cinemática, resultou nas seguintes considerações:

Observa-se que as linhas de interseção das superfícies das descontinuidades identificadas encontram-se na região limitada pelo círculo que representa a face da vertente e o círculo definido pelo ângulo de atrito ϕ . Este fato permite classificar a vertente, de acordo com esta abordagem, como potencialmente instável.

8.3. SETOR 2

Na realização do teste de Markland (Figura 8.4), o ângulo de atrito adotado para o setor foi de 14° , correspondente ao valor recomendado a partir dos resultados da aplicação do sistema de classificação RMR.

Para o teste, foram consideradas a escarpa E2 (078/90) e a vertente V1 (095/45), que identificam a face da encosta. No mesmo estereograma, foram plotadas as superfícies representativas dos planos de ruptura em potencial, foliação F1 (095/41), fratura F2 (050/90) e a fratura F3 (130/90).

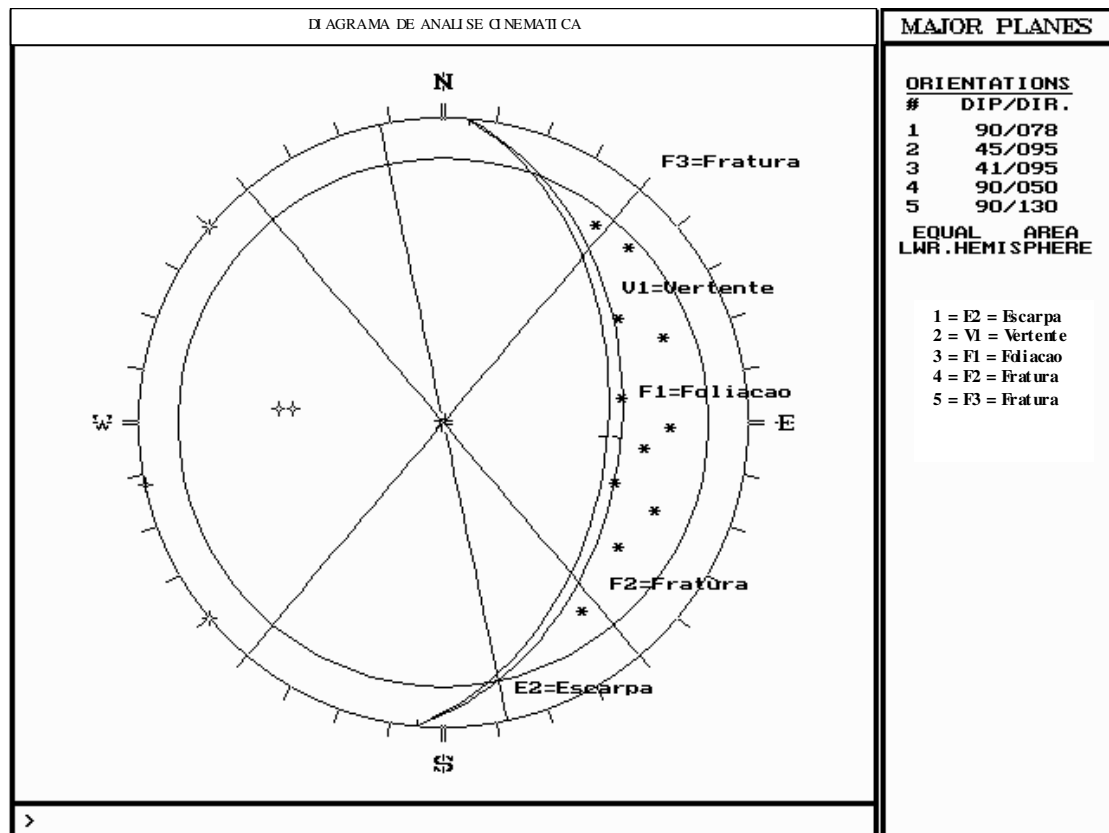


Figura 8.4 – Teste de Markland, para a escarpa E2 e a vertente V1 do setor 2.

A superfície potencial de ruptura planar é condicionada pela família de descontinuidades F1 (foliação).

Ao se considerar a família de descontinuidades F1 (foliação) e a família de descontinuidades F2, encontra-se a mesma situação descrita para o setor 1.

Podem ocorrer superfícies de rupturas em cunha nos planos de interseção entre as famílias de descontinuidades F1 com F2 e F1 com F3.

Para os casos de rupturas por tombamento, identificados no campo, não foi possível a verificação da sua possibilidade, já que o teste de Markland não se aplica a esta situação.

Neste setor, o mecanismo de ruptura predominante é o planar. Percebe-se, localmente, a formação de rupturas pela presença das fraturas (F2 e F3) que se interceptam e a ruptura ocorre no plano de interseção das mesmas. Em campo, observa-se claramente o tombamento e rolamento de blocos e o deslocamento de lascas ao longo das escarpas.

8.4. SETOR 3

Ao se fazer o teste de Markland (Figura 8.5), o ângulo de atrito considerado para o setor foi de 14° , correspondente ao valor médio encontrado a partir dos resultados da aplicação do sistema de classificação RMR.

Foram considerados neste setor a escarpa E3 (055/90) e a vertente V2 (090/38), que identificam a face da encosta. No mesmo estereograma foram plotadas as superfícies representativas dos planos de ruptura em potencial, foliação F1 (095/41), fratura F2 (050/90) e a fratura F3 (130/90).

Na análise e interpretação do teste, verifica-se que a linha de interseção das superfícies de descontinuidade da família F1 com F3 não encontram-se na região pontilhada delimitada pela face da vertente e pelo círculo definido pelo ângulo de atrito do setor. Esta constatação caracteriza o setor, de acordo com o teste de Markland, como potencialmente instável.

Ao se analisar a interseção entre as superfícies que representam a família F1 e a família F2, nota-se que a inclinação da linha de interseção é maior do que o mergulho

da face da vertente, medido na direção em que poderia acontecer o deslocamento. Portanto, não se pode afirmar a possibilidade de rupturas em cunha.

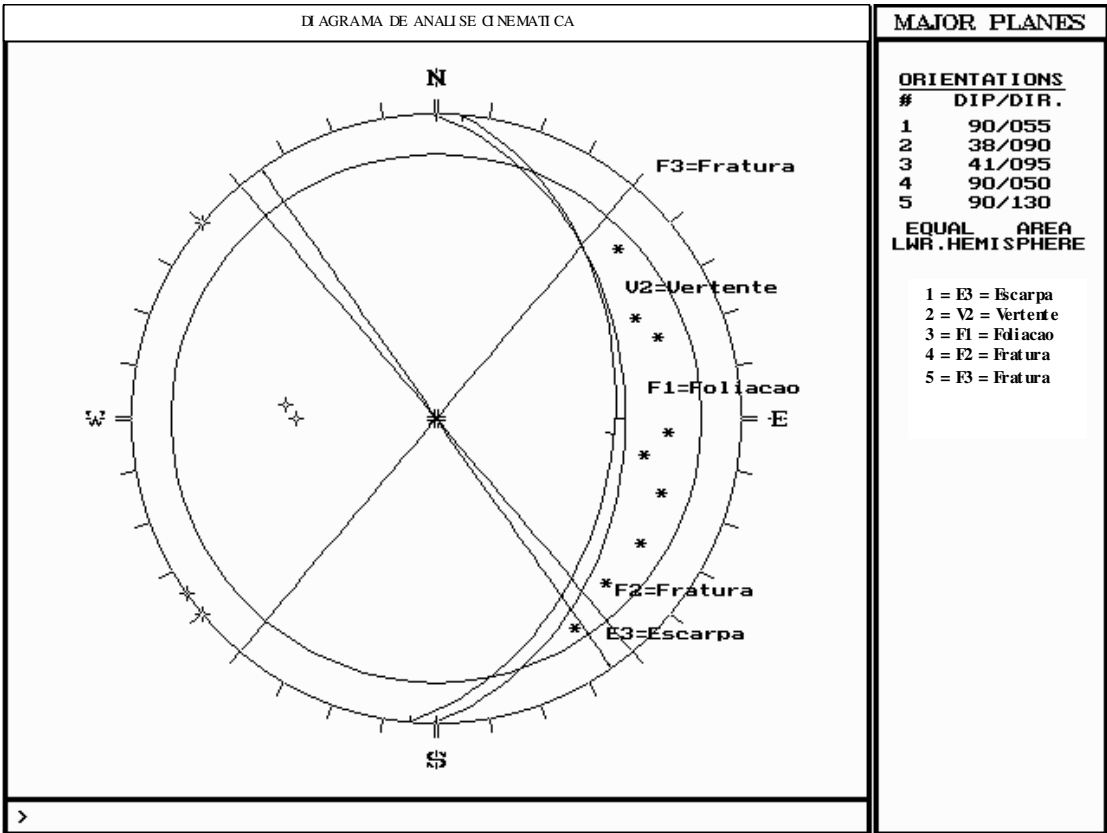


Figura 8.5 – Teste de Markland, para a escarpa E3 e a vertente V2 do setor 3.

Há também os escorregamentos do depósito de tálus que são constituídos por material terroso e por blocos de xisto muito pouco resistentes, que se desfazem sob a pressão dos dedos. Nota-se também o deslocamento de lascas rochosas nas zonas das escarpas.

8.5. SETOR 4

Procedeu-se ao teste de Markland (Figura 8.6), considerando-se um ângulo de atrito para o setor de 30°, igual ao valor determinado no ensaio de cisalhamento direto.

Para o teste, foram utilizados a escarpa E4 (075/90) e a vertente V2 (090/38), que identificam a face da encosta. No mesmo estereograma foram desenhadas as

superfícies representativas dos planos de ruptura em potencial, foliação F1 (090/41), fratura F2 (050/90) e a fratura F3 (130/90).

No estudo do teste, observou-se que a interseção das superfícies de descontinuidades da família F1 com F2 e F1 com F3 não se encontram na região limitada pela face da vertente e o círculo definido pelo ângulo de atrito do setor, caracterizando a estabilidade do setor quando a mecanismos de rupturas por cunha.

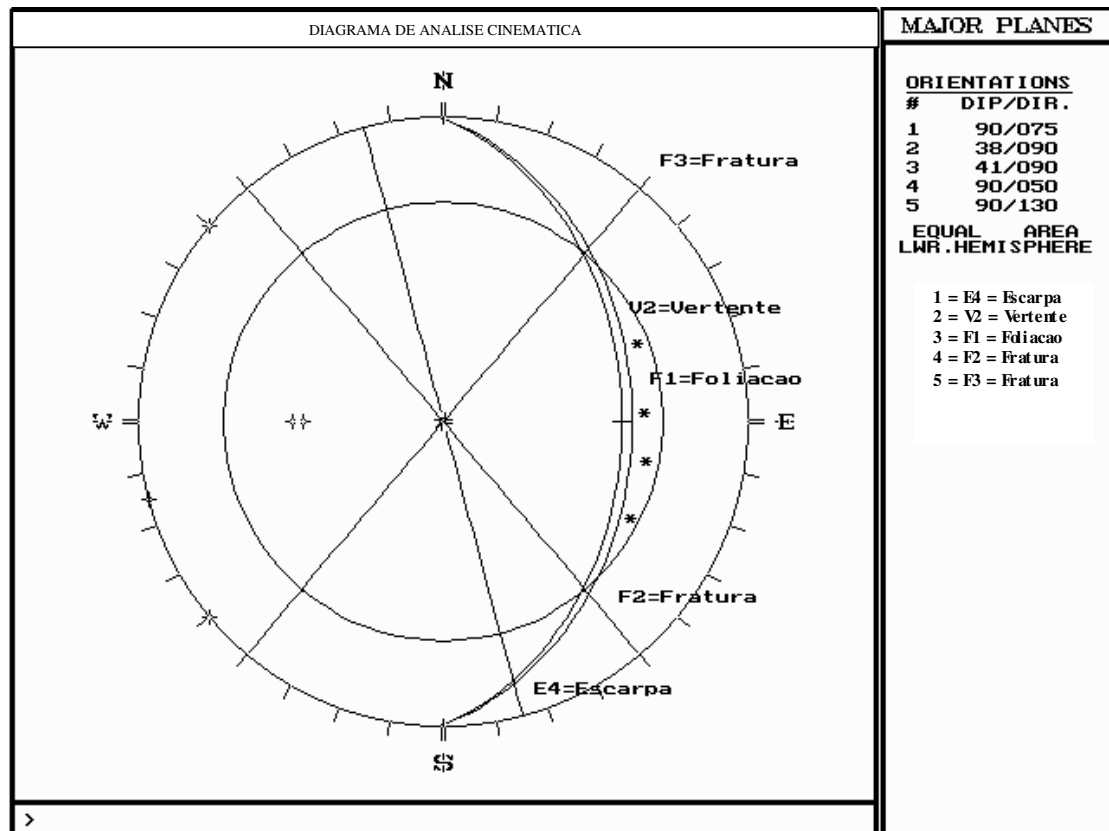


Figura 8.6 – Teste de Markland, para a escarpa E4 e a vertente V2 do setor 4.

Apesar do diagrama não apontar a possibilidade de deslizamentos planares, este mecanismo de ruptura pode ser induzido a partir do desconfinamento propiciado pelos efeitos dos processos erosivos no depósito de tálus.

No campo, identificam-se escorregamentos de tálus com escorregamentos superficiais e sulcos erosivos (sem maiores conseqüências). Há processos de ruptura translacional, queda e rolamento de blocos, com dimensões que variam da ordem de centímetros a decímetros.

8.6. SETOR 5

O valor de 14° foi considerado para o ângulo de atrito como sendo o valor médio encontrado a partir dos resultados da aplicação do sistema de classificação RMR, na realização do teste de Markland.

Foram plotados os grandes círculos que representam a escarpa E5 (035/90) e a vertente V3 (085/51), que representam a face da encosta, na execução do teste de Markland (Figura 8.7). No mesmo estereograma, foram lançadas as superfícies representativas das discontinuidades, foliação F1 (085/41), fratura F2 (050/90), fratura F3 (130/90) e fratura F4 (080/90).

Na análise do teste, verifica-se que as linhas de interseção das superfícies de descontinuidade identificadas (F1 x F2 e F1 x F3) encontram-se também na região limitada pelo círculo que representa a face da vertente e o círculo definido pelo ângulo de atrito ϕ . No entanto as condições geométricas segundo o método de Markland apontam para a estabilidade quanto a movimento por cunha.

Já na interseção da família F1 com a família F4, não se pode afirmar que há ruptura em cunha, de acordo com a abordagem de Markland, pois a linha de interseção destes planos encontra-se fora da região limitada pela face da vertente e o círculo definido pelo ângulo de atrito do setor.

A partir dos trabalhos de campo, foi possível detectar perfeitamente, neste setor que é o mais crítico, que a vertente encontra-se totalmente instabilizada por mecanismo de ruptura planar, por tombamento de blocos e corridas de tálus (escorregamentos superficiais). Observa-se ainda a ocorrência de deslocamento de lascas rochosas.

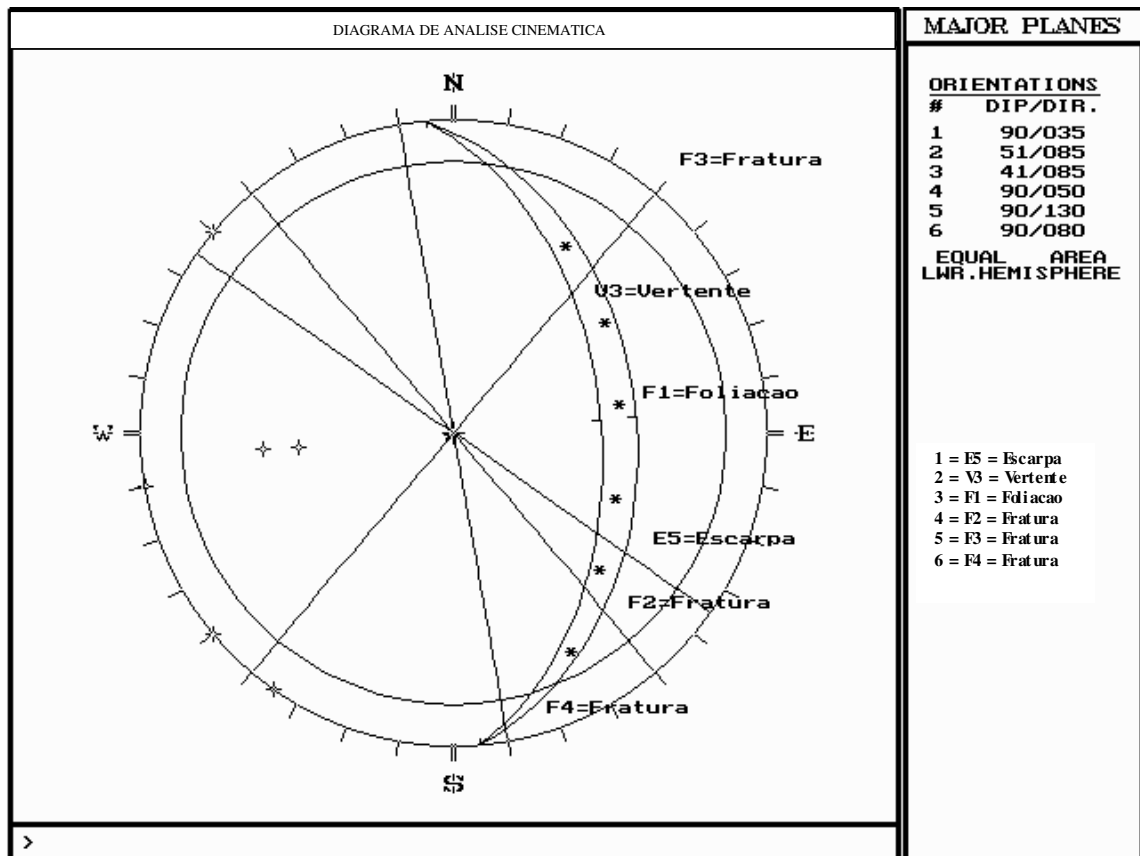


Figura 8.7 – Teste de Markland, para a escarpa E5 e a vertente V3 do setor 5.

8.7. SETOR 6

No teste de Markland (Figura 8.8), considerou-se um o ângulo de atrito igual a 30° , valor determinado no ensaio de cisalhamento direto.

Na execução do teste, foram consideradas a escarpa E6 (042/90), a escarpa E7 (078/90) e a vertente V4 (073/54), que identificam a face da encosta. No mesmo estereograma foram plotadas as superfícies representativas dos planos de ruptura em potencial, foliação F1 (073/41), fratura F2 (050/90) e a fratura F3 (130/90).

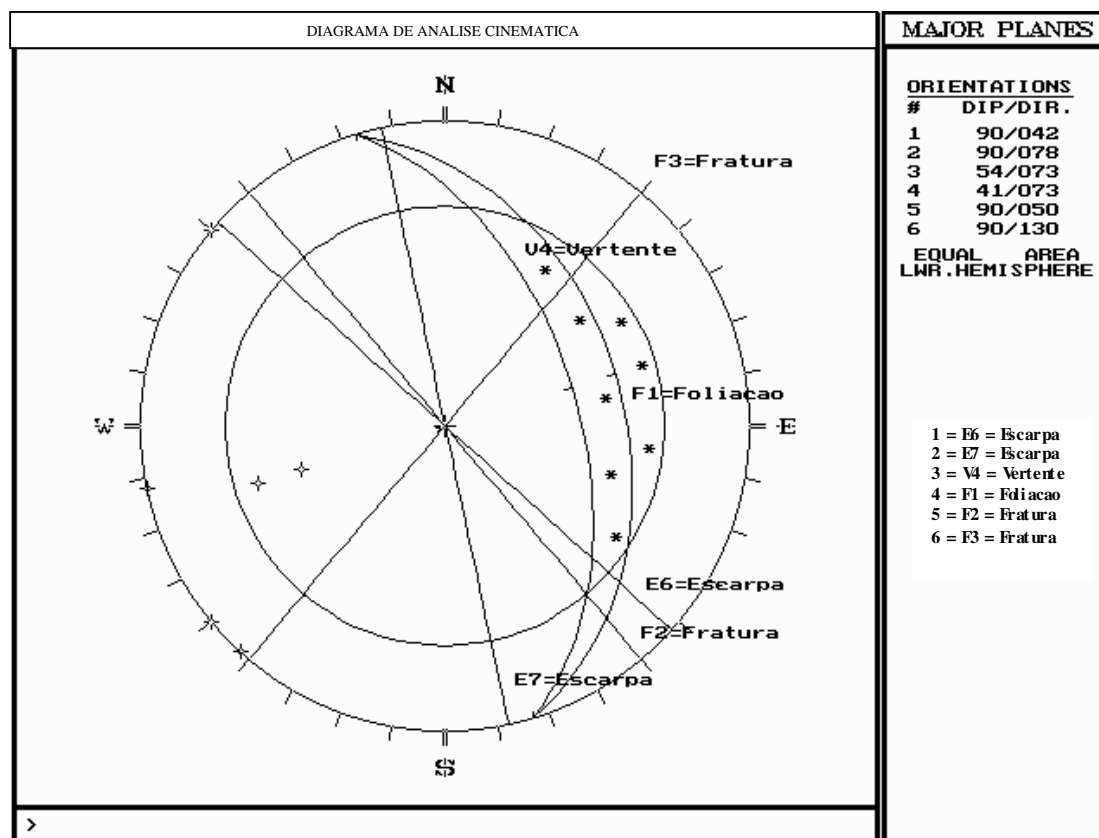


Figura 8.8 – Teste de Markland, para as escarpas (E6 e E7) e a vertente V4 do setor 6.

Na interpretação dos resultados, a linha de interseção das superfícies de descontinuidade da família F1 com F3 encontra-se na região hachurada delimitada pela face da vertente e pelo círculo definido pelo ângulo de atrito do setor. Como nos outros setores, as condições de geometria apontam para a estabilidade. Já ao se analisar a interseção entre as superfícies que representam a família F1 e a família F2, verifica-se que a linha está posicionada externamente à área hachurada, sem riscos de rupturas em cunha.

A ruptura planar (Figuras 8.9 e 8.10) pode ocorrer ao longo da família F1.

Percebe-se a ocorrência predominante neste setor, de rupturas por tombamento de blocos (Figura 8.11), mas observa-se ainda rupturas planares e escorregamentos de talus (em pequena escala). Há surgência de água na face das escarpas e presença de gotejamento em pontos específicos por infiltração nos períodos de chuva.



Figura 8.9. Ruptura planar em vertentes de xisto no agrupamento I.



Figura 8.10. Ruptura em escarpas de xisto no agrupamento I



Figura 8.11. Tombamento de blocos em taludes de xisto no agrupamento I

CAPÍTULO 9

CONCEPÇÃO E PROPOSTAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL

Para o desenvolvimento das concepções e modelos de estabilização, partiu-se da identificação e dos potenciais mecanismos de instabilização e de uma abrangente caracterização geológico-geotécnica da encosta do Morro do Curral, estudos apresentados nos capítulos anteriores. A compartimentação do maciço, em vinte setores, permitiu o agrupamento em três zonas de comportamentos diferenciados, com diferentes graus de prioridade e contemplando diversas frentes de intervenção ao longo da encosta.

A ênfase especial será centrada no agrupamento I, zona crítica em termos da estabilização geral da encosta. O equacionamento das soluções de estabilização da encosta foi apoiado na elaboração de modelos fenomenológicos que representam, de maneira adequada, os processos de instabilização atuantes ou potenciais.

A concepção das obras de estabilização obedeceu ao conceito de segurança global da encosta e alternativas menos onerosas, sendo para isso adotadas soluções distintas para cada agrupamento, tendo como diretriz básica a atuação diretamente nos mecanismos e nos agentes predisponentes da instabilização.

A estabilização de uma encosta pode ser garantida através de duas maneiras distintas, seja atuando através da mitigação dos agentes desestabilizadores, através de obras de proteção da encosta e sem estruturas de contenção ou atuando na introdução de esforços externos estabilizadores, mediante obras de estruturas de contenção.

De acordo com Carvalho (1991), as obras com estruturas de contenção podem ser classificadas em:

1. Obras de contenção passivas: apresentam reação contra tendências de movimentação dos taludes, como por exemplo, muros de arrimo (gravidade, flexão, etc), cortinas cravadas e cortinas ou muros ancorados sem protensão;

2. Obras de contenção ativas: produzem compressão no terreno, aumentando sua resistência por atrito, além de oferecer reações às tendências de movimentação do talude, como por exemplo, muros e cortinas atirantadas, placas atirantadas, etc;
3. Obras de reforço de maciço: proporcionam um incremento na resistência média ao cisalhamento de certas porções do maciço, como por exemplo, injeções de cimento e resinas químicas, estacas e micro-estacas de concreto, reforços com geossintéticos, etc.

As obras de proteção e as obras sem estruturas de contenção representam um investimento relativamente pequeno e, portanto, tornam-se soluções prioritárias e alternativas preferenciais. As obras com estruturas de contenção apresentam elevado custo, só sendo justificadas quando eliminadas as alternativas anteriores.

As soluções mais indicadas são as que consideram a melhor relação custo/benefício, o que significa priorizar a utilização de parte dos recursos (mão de obra, materiais e equipamentos) da própria região, adotar metodologias executivas mais simples e utilizar equipamentos disponíveis no local da implantação da obra.

Em função do modelo estrutural da encosta e dos parâmetros geomecânicos obtidos, são recomendados, nos itens subseqüentes, diferentes formas de tratamento e obras de controle e minimização dos problemas geotécnicos detectados nos diferentes setores do maciço rochoso da encosta do Morro do Curral.

9.1. AGRUPAMENTO I (SETORES 1 A 6)

Conforme a caracterização geotécnica prévia; a situação da área é de instabilidade, com susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e elevado potencial de risco, uma vez que existem várias edificações adjacentes, onde serão instalados o núcleo de criação/produção artística, a praça e o palco de eventos ao ar livre, o prédio do saguão principal e os prédios de salas/auditórios do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto.

Como a encosta apresenta muitos blocos e lascas rochosas instáveis, as soluções convencionais como revestimentos de concreto armado, concreto projetado ou produtos

betuminosos, com eventuais ancoragens nos locais onde ocorrem blocos ou lascas de maiores dimensões descolados do maciço, seriam muito onerosas (Nunes,1987).

Os parâmetros geomecânicos mostram que o xisto local é uma rocha branda, de baixa rigidez e elevada deformabilidade, o que precisa ser considerado na solução a ser adotada. Neste caso, propõe-se uma solução integrada, composta por obras com estrutura de contenção (muro de gravidade), complementadas com obras de proteção (barreiras vegetais) e obras sem estrutura de contenção (drenagem superficial e profunda).

No sopé da encosta e ao longo da margem do Córrego Caquende / dos Contos propõe-se executar uma estrutura de espera em muro de gravidade tipo gabião (caixa), com transição em geotêxtil. Esta estrutura teria por objetivo acumular as lascas e blocos de rocha deslocados da encosta, isolar e acumular os detritos, impedir o estrangulamento e assoreamento do leito do córrego, e atuar como parede na hipótese de canalização do córrego, curso de água bastante contaminado e poluído, berço de procriação de roedores e insetos e foco potencial de doenças.

Nas escarpas e vertentes, recomenda-se a limpeza dos detritos soltos e entulhos, e sua proteção superficial com uma cobertura vegetal com biomantas para desenvolvimento da vegetação e confinamento dos materiais soltos, bem como prover a proteção superficial contra os efeitos das gotas de chuva e fluxos superficiais durante o período de germinação e crescimento da capa vegetal. Os materiais biodegradáveis da biomanta desaparecerão após o crescimento da vegetação.

Na face da encosta, recomenda-se uma malha de drenos sub-horizontais profundos, para redução das poropressões do maciço, estabelecendo zonas preferenciais de fluxo. A drenagem superficial será adicionalmente melhorada com revestimento em calhas metálicas das valas de drenagem, eliminando-se a possibilidade de carreamento de finos e proporcionando-se o completo controle e direcionamento do fluxo de água superficial.

A estrutura de contenção, na forma de um muro de espera do tipo gabião, deverá ter a base de sua fundação assentada no xisto, regularizado e nivelado, antes da colocação de uma camada de concreto magro ($f_{ck} = 11 \text{ MPa}$), com espessura de 10 cm. As características técnicas da estrutura de contenção do muro em gabião são sua elevada permeabilidade e grande flexibilidade, permitindo construir estruturas monolíticas

altamente drenantes e capazes de aceitar deslocamentos e deformações sem colapso. A viabilidade econômica resulta da rapidez de construção, facilidade de mão de obra e utilização direta de material natural.

O gabião será do tipo caixa, em elementos na forma de prismas retangulares, formados por redes de aço zincado, com malha hexagonal de dupla torção tipo 8x10 e fio de aço doce com dupla galvanização e revestido por uma camada de PVC de elevada resistência à corrosão. As caixas serão preenchidas com pedra de mão, maciças, com pesos unitários entre 2 e 15 Kgf e tamanho compreendido entre a maior dimensão da malha e o dobro deste valor. As pedras devem ser arrumadas dentro das caixas, de modo a se obter um arranjo bastante confinado.

A seção transversal do muro será definida por uma altura igual a 5 m e base igual a 3 m, com degraus internos de 0,50 m, inclinados contra a encosta de 6°. A base será assentada na cota 1056, ou seja 0,30 m abaixo da lâmina de água e a crista ficará na cota 1061. A posição inicial do muro será numa distância de 5 m a partir do muro existente, limite das edificações e margem esquerda do Córrego Caquende / dos Contos, que possui um canal de 5 m de largura.

A extensão total do muro de gabião será de 90 m, comportando um volume total de 900 m³, conforme a geometria dos elementos discriminados na Tabela 9.1

Tabela 9.1. Quantidade e geometria dos elementos do muro de gabião.

Elementos da Estrutura em Gabiões					
Número	Comprimento	Largura	Altura	Volume	Diafragma
(n)	(m)	(m)	(m)	(m ³)	(n)
90	3,0	1,0	1,0	270	180
90	2,5	1,0	1,0	225	180
90	2,0	1,0	1,0	180	90
90	1,5	1,0	1,0	135	-
120	1,5	1,0	0,5	90	-

Para a construção do muro de contenção em gabiões, será necessário uma escavação na base da encosta para o encaixe e o alinhamento do muro com volume estimados de 640 m³. As caixas devem ser montadas individualmente, com costuras executadas de forma contínua, por arames de mesmas características dos usados na fabricação do gabião. O comportamento de forma monolítica da estrutura de contenção

é obtido com costura ao longo das arestas de contato, tanto para caixas colocadas lado a lado, como para camadas sobrepostas. O contato entre os painéis de rede garante que, após os gabiões cheios, ocorra uma transferência de resistência ao longo de toda a superfície, mantendo-se constante o ângulo de atrito interno das pedras.

Deve-se atentar que a instalação da manta geotêxtil precisa ser criteriosa, de modo a se evitar bolsões e/ou dobramentos que possam comprometer a sua eficiência como filtro. No contato com o muro, deve-se tomar o cuidado de evitar a perfuração e/ou rasgamento da manta pelo material do maciço rochoso, que é composto de blocos.

A área a ser protegida pela biomanta é de 270 m², correspondente às vertentes, principalmente à do setor 5, que se encontra em situação mais crítica, exigindo urgente uma proteção superficial.

A colocação de drenos sub-horizontais profundos (DHP) deverá ser feita em duas linhas de drenagem, sendo uma na cota 1062 e outra na cota 1080. Os drenos deverão ter espaçamentos de 10 m e comprimentos de 18 m, totalizando 21 drenos. Os tubos serão de PVC rígido, com diâmetro de 50 mm, perfurado com furos de 4 mm e envolvidos com geotêxtil como sistema filtrante, evitando-se, assim, a colmatação e o carreamento do solo adjacente. Os furos terão diâmetro de 75 mm e uma inclinação de 5° com relação a horizontal, para favorecer o fluxo gravitacional. Após a perfuração do terreno, proceder-se-á a inserção do tubo drenante encamisado pela manta têxtil. A calha deverá ter diâmetro de 0,40 m, espessura da chapa de 1,5 mm e comprimento de 25 m, colocada no talvegue central.

9.2. AGRUPAMENTO II (SETORES 14 A 20)

Esta área, conforme o mapa geotécnico, é formada pela zona do topo da encosta, cuja situação é de estabilidade, apresentando uma cobertura de solo variável do tipo silto-argiloso ou areno-siltoso com revestimento vegetal. A susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa é baixa e o risco reduzido, uma vez, que as

edificações do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto encontram-se afastadas desta área.

A solução racional para esta área é a realização de obras de proteção (barreiras vegetais) e obras sem estrutura de contenção (drenagem superficial). Nas obras de proteção, recomenda-se a hidrossemeadura convencional para recomposição do ambiente, formando uma defesa viva na cobertura de solo, essencial para manutenção do equilíbrio natural. Indica-se ainda a colocação de calhas metálicas para conduzir a água superficial na drenagem natural, de forma a disciplinar o fluxo das águas na encosta. As calhas deverão ter diâmetro de 0,40 m, espessuras da chapa de 1,5 mm e comprimentos de 150 m.

9.3. AGRUPAMENTO III (SETORES 7 A 13)

A situação da área é também de estabilidade, com susceptibilidade média à ocorrência de movimentos de massa e risco reduzido, pois esta zona está fora da área edificada do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto.

A solução viabilizada para esta área consiste de obras de proteção (barreiras vegetais) e obras sem estrutura de contenção (drenagem superficial e proteção superficial natural e artificial).

Neste contexto, propõe-se a limpeza das escarpas e vertentes, com retirada dos blocos deslocados e das lascas soltas. No sopé da encosta e margem do Córrego Caquende, recomenda-se adotar a bacia de sedimentos como área de escape.

Nas obras de proteção, as barreiras vegetais serão intensificadas. É sugerida uma proteção viva na forma de barreiras, para reter maiores volumes de detritos e, com isto, evitar o carreamento de materiais até o Córrego Caquende. As barreiras constituirão duas linhas de contenção, devendo ser em paus roliços com diâmetro de 0,12m e comprimento total de 3 m. As áreas do depósito de sedimentos (área de escape), bem como os setores 11, 12 e 13 devem ser arborizados, criando-se um bosque artificial que será uma defesa viva e eficiente. Nestes locais, propõe-se ainda a execução de uma camada vegetal, com aplicação de hidrossemeadura convencional, para recomposição

de toda a área e redução da energia cinética da água e consequentemente, do volume de carregamento de finos. A área a ser arborizada é de 100 m², com de hidrosemeadura convencional em 150 m².

As valas de drenagem natural deverão ter revestimento em calhas metálicas para controle e direcionamento do fluxo de água, com diâmetros de 0,40 m e espessuras da chapa de 1,5 mm e comprimentos de 20 m.

FIG PLANTA-GERAL AUTO CAD

Figura 9.1. Planta da proposta de estabilização da encosta do Morro do Curral

FIG SEÇÃO TRANSVERAL DO AUTOCAD

Figura 9.2. Seção transversal da proposta de estabilização da encosta do Morro do Curral

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES E AVALIAÇÃO GERAL DA ENCOSTA DO MORRO DO CURRAL

10.1 – CONDICIONANTES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DA ENCOSTA

O objetivo deste trabalho foi o de estudar, de forma integrada e abrangente, os condicionantes geológico-geotécnicos da encosta do Morro do Curral, visando estabelecer os subsídios para uma clara interpretação dos mecanismos de instabilização predisponentes e os critérios de projeto a serem implementados, para correção e minimização dos riscos de futuras rupturas ou movimentos de massa, que poderiam vir a comprometer as atividades do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. A abrangência deste estudo esteve condicionada a levantamentos de campo, resultados de ensaios de laboratório e aplicação dos sistemas de classificação geomecânica aos xistos que constituem as litologias da encosta. O escopo do trabalho inclui a apresentação dos dados, formulação de critérios de projeto e propostas de soluções conceituais relativas aos setores estudados, no sentido de subsidiar o projeto das obras de estabilização propostas.

A Encosta do Morro do Curral nas proximidades do Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto é um maciço rochoso fraturado, constituído essencialmente por xistos da Formação Sabará. O maciço é compartimentado por famílias de descontinuidades, que foram identificadas por levantamentos geológico-geotécnicos em campanhas de campo, nas quais pôde-se verificar as distribuições médias dos parâmetros e proceder-se à subdivisão do maciço rochoso em vintes áreas distintas, denominadas setores.

As características das famílias de descontinuidades, de modo geral, são essencialmente similares em todos os setores. Detectou-se o predomínio de duas famílias de fraturas em toda a área da encosta, com direções N50E e E130S, apresentando altos mergulhos para NW e SW. A xistosidade constitui a família de

descontinuidades mais persistente. As fraturas são abertas ou fechadas e, quando preenchidas, o são predominantemente por material areno-argiloso alterado (As paredes das descontinuidades apresentam-se preferencialmente em degraus, irregulares e alteradas).

O maciço é essencialmente seco (16 setores), com três setores (6, 7 e 8) apresentando gotejamento de água e um setor (10) com filetes de água, apresentando-se homogêneo em sua composição mineralógica. Variações das características geotécnicas das descontinuidades foram identificadas nos levantamentos de campo e nos resultados dos ensaios feitos em laboratório.

Em relação à modelação geomecânica do maciço, os parâmetros obtidos, guardadas as diferenças conceituais entre os diferentes métodos, deram resultados bem compatíveis e coerentes com o que se observa em campo. Os parâmetros geomecânicos RMR e Q apresentaram boa correlação, sendo que os mais divergentes podem estar relacionados às diferenças conceituais e de faixa de valores entre as duas classificações. A partir dos resultados de RMR, foram estabelecidas correlações empíricas para obtenção dos módulos de deformabilidade do material.

No caso de litologias como xistos alterados, a aplicação de sistemas de classificação geomecânica fica bastante complicada, pelas dificuldades de se determinar com precisão todas as famílias de descontinuidades existentes, uma vez que a continuidade e persistência destas feições ficam mascaradas pelo padrão de fraturamento e grau de alteração do maciço.

Os ensaios puntiformes realizados foram muito importantes para a determinação da resistência e caracterização da anisotropia nas direções paralela e perpendicular à foliação.

Estes resultados, associados aos ensaios de laboratório para caracterização física do xisto, evidenciaram o comportamento de rochas brandas para os xistos da encosta.

Os ensaios de cisalhamento direto permitiram quantificar os parâmetros de resistência destas rochas, ratificando os efeitos significativos da alteração e da anisotropia sobre o comportamento geotécnico destas litologias.

Adicionalmente, as análises das lâminas do xisto permitiram estabelecer diferenças em termos de composição mineralógica do xisto cinza (menos alterado) e do xisto marrom a avermelhado (mais alterado) e justificar as variações de resistência ao

cisalhamento direto destas litologias, devido à oxidação por infiltração constituindo uma superfície mais penetrativa e menos homogênea nos materiais mais susceptíveis à intemperização.

10.2. MECANISMOS DE INSTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA

Na zona correspondente ao Agrupamento I da encosta, constituída pela charneira e pelos flancos da zona de dobramento, predominam mecanismos de ruptura planar nas vertentes ao longo das famílias de foliação (F1), e por cunha nos planos de interseção das famílias de fraturas F2 e F3. Observa-se também o tombamento e rolamento de blocos e o deslocamento de lascas ao longo das escarpas. Verificou-se, ainda, escorregamentos de depósitos de tálus, surgência de água na face das escarpas e presença de gotejamento em pontos específicos nos períodos de chuva.

Na região da encosta designada por Agrupamento II, caracterizada pelo topo da encosta e coberturas de solo silto-argiloso ou areno-siltoso e revestimento vegetal, não se evidenciam sinais de instabilizações potenciais. Esta área da encosta constitui a zona de recarga das águas por infiltração.

O agrupamento III é a zona perturbada pelo falhamento regional, comportando mecanismos de instabilização por erosão concentrada e blocos soltos nas vertentes. Identifica-se, ainda, o deslocamento de lascas rochosas e blocos deslocados do maciço nas escarpas mais altas e íngremes, mas a situação global é de estabilidade com baixa susceptibilidade a rupturas localizadas.

10.3. SUBSÍDIOS PARA AS OBRAS DE ESTABILIZAÇÃO DA ENCOSTA

O padrão geomecânico determinado para o maciço rochoso é o de uma rocha branda, com baixa rigidez e elevada deformabilidade, com modelo estrutural de uma dobra aberta, de eixo na direção aproximadamente N/S e flanco bem inclinado. Neste

contexto, propõe-se uma solução integrada, composta por obras com estrutura de contenção em muro de gravidade tipo gabião, conjugado com obras de proteção, feitas de barreiras vegetais com paus roliços formando uma cortina vazada e obras sem estrutura de contenção. Uma condição de drenagem profunda eficiente é prevista através de drenos sub-horizontais em duas linhas distintas, enquanto a drenagem superficial é garantida por meios de canaletas com revestimento metálico. Ao longo de toda a encosta, recomenda-se a utilização de manto vegetal, formando uma defesa viva na cobertura de solo, através de hidrosemeadura e uso de biomantas para confinamento dos materiais soltos e desenvolvimento da vegetação local. Adicionalmente, prevê-se ainda a criação de um horto artificial em setor específico, com o plantio de árvores típicas da região.

10.4. SUGESTÕES PARA ESTUDOS ADICIONAIS

Como procedimentos adicionais, recomenda-se o estudo da adoção da solução de canalização do Córrego Caquende / dos Contos em seção fechada numa extensão de aproximadamente 150 m, correspondente ao trecho destes cursos d'água diretamente situados na área de influência do empreendimento.

Seria interessante desenvolver um projeto simplificado de controle e monitoramento da encosta, avaliando-se a eficácia das soluções implementadas, ao longo do tempo e particularmente nas estações chuvosas.

Adicionalmente, estes estudos e processos de monitoramento poderiam ser extrapolados ao domínio geral da encosta do Morro do Curral e demais encostas adjacentes, no sentido de se evitar mecanismos potenciais de instabilização, atualmente detectáveis nesta região. Estudos similares poderiam ser expandidos a encostas de outras unidades litoestratigráficas do espaço urbano da cidade de Ouro Preto.

BIBLIOGRAFIAS REFERENCIADAS

- Almeida, R. M. R. de. (1994), Classificação geomecânica de itabiritos em mineração à céu aberto – Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. Rio de Janeiro-RJ. Tese de mestrado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 110p.
- Augusto Filho, O. (1994), Cartas de risco de escorregamento: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica/USP, 168p.
- Barton, N. (1990), Rock Joints. Proceedings of the International Symposium on Rock Joints Loen/Norway. pp.11-44;125-140.
- Barton, N.; Lien, R.; Lunde, J. (1974), Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics. V6, nº4, p.189-236.
- Bieniawski, Z. T. (1989), Engineering rock mass classification. New York. John Wiley. 215p
- Bonuccelli, T. (1999), Estudos dos movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos na área urbana de Ouro Preto/MG. Tese de Doutorado em Engenharia Civil: Área de Geotécnica apresentada na Escola de Engenharia da USP/São Carlos.
- Bonuccelli, T.; Zuquette, L. V. (1999), Movimentos gravitacionais de massa e erosões na cidade histórica de Ouro Preto, Brasil. Revista Portuguesa de Geotecnia. 23p.
- Broch, E. (1983), Estimation of strength anisotropy using the point load test. Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol.20. nº 4. p. 181-187.
- Broch, E.; Franklin, J. A. (1972), The point load strength test. Intl. J. Rock Mechanics and Mining Sciences. Vol. 9. 1972. p. 669-697.
- Brown, E. T. (1981), Rock Characterization Testing & Monitoring-ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford, 211p.

- Brown, E. T. (1983), Suggested method for rock characterization testing and monitoring, published for International Society for Rock Mechanics, ISRM. editor, Pergamon Press, 211p.
- Carvalho, E. T. (1982), Carta geotécnica de Ouro Preto. Dissertação de mestrado na Universidade Nova de Lisboa.
- Carvalho, E. T. (1999), Geologia urbana para todos – Uma visão de Belo Horizonte. Belo Horizonte – MG.
- Carvalho, P. A. S. (1991), Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo. IPT. 410p.
- Dorr II, J. V. N.(1969), Phisiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Brasil. Washington. DNPM/USGS. 109p.
- Dorr II, J. V. N.; Gair, J. E.; Pomerene, J. B.; Ryeneerson, G. A. (1957), Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Trad. Barbosa, A. L. M.. DNPM/DFPM. 33p.
- Gomes, R. C. (1991), Classificações geomecânicas de maciços rochosos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 37p.
- Goodman, E. R. (1993), Engineering geology. Rock in engineering constrution. John Wiley. Singapore. 412p.
- Goodman, R. E. (1989), Introduction to rock mechanics. 2° ed. New York. John Wiley. 562p.
- Guidicini, G. E.; Nieble, C. M. (1976), Estabilidade de taludes naturais e de escavações. São Paulo. 170p.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984), Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2a. edição. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 195p.
- Hoek, E.; Bray, J. W. (1981), Rock slope engeneering, IMM. 358p
- Hoek, E.; Brown, E. T. (1980), Underground excavations in rock. London, IMM. 527p.

- Hutchinson, J. N. (1988), Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrogeology. General report. Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, v.1, p3-35.
- Lauffer, H. (1958), Gebirgsklassiferung Für der Stollenbau. Geologie and Bauwesen. P. 46-51
- Markland, J. T. (1972), A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected in. Imperial College Rock Mechanics Research Report. N. 19. 10p.
- Norma, G. (1994), Considerações técnicas sobre a localização do CACOP no perímetro de Ouro Preto. 20p
- Nunes, A . J. da C. (1992), Engenharia Geotécnica. O legado de A. J. da Costa Nunes Tecnosolo. Rio de Janeiro/RJ
- Oliveira, A. M. dos S.; Brito, S. N. A. (1998), Geologia de engenharia. ABGE São Paulo-SP. 450p.
- Palmstrom, A. (1975), Characterizing the degree of jointing and rock mass quality. Internal report. Berdal, Oslo.
- Priest, S. D. & Hudson, J.A . (1976), Discontinuity spacing in rock. International journal of rock mechanics, Mining science & Geomechanics, cap. 13, p. 134-153
- Priest, S.D. (1985), Hemispherical projection methods in rock mechanics. London,
- Rocha, M. (1981), Mecânica das rochas. Lisboa, LNEC. 445p.
- Romana, M. (1985). Nuevos factores de ajuste para la aplicacion de la classification de Bieniawski a los taludes. In: Coloquio sobre Ingenieria Geológica. Barcelona. Ponebcias. Universidad Politécnica de Catalunya. P 139-153.
- Romana, M. (1991), SMR classification. In: 7th International Congress of Rock Mechanics, vol.2, p.955-960.
- Romana, M. (1996), The SMR geomechanical classification for slopes: A critical ten-years review. Landslides, Balkema (ed), p.255-267.

- Sharpe, C. F. S. (1938), Landslides and related phenomena. Columbia University Press. New York. 137p.
- Skempton, A.; Hutchinson, J. (1969), Stability of natural slope and embankment foundations. Proc. 7th Intern. Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering, p.291- 340.
- Sobreira, F. G. (1990), Levantamento de áreas de riscos no espaço urbano de Ouro Preto-MG. UFOP. 87p.
- Sobreira, F. G. (1992), Urban landslides as a consequence of old mining in Ouro Preto, Brazil. In: Landslides Symposium, 6^o,1992, Christchurch. Proceedings, New Zealand; p.1419-1422.
- Sobreira, F. G.; Araújo, L. G.; Bonuccelli, T. J. (1990), Levantamento de soluções estruturais para a contenção de encostas em Ouro Preto. Ouro Preto-MG. UFOP. 91p.
- Sobreira, F. G.; Fonseca, M. A. (1998), Geologic risk resulting from the land use of old mining sites in the Piedade Neighborhood. Ouro Preto-MG. Brazil. In: 8th international IAEG Congress. Balkema, Rotterdam, p 2025-2029.
- Souza, M. L. (1996), Mapeamento geotécnico da cidade de Ouro Preto/MG (escala 1:1000), Susceptibilidade aos movimentos de massa e processos correlatos. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da USP/São Carlos.
- Terzaghi, K. (1950), Mechanism of landslides. Havard University. Publicação 488, p.88-123.
- Tourinho, M. A. (1990), Estudos técnicos sobre o nível econômico das camadas sociais de Ouro Preto. 60p
- Vargas, E. A.; Nunes, A. L. L. S. (1992), Noções de mecânica das rochas. PUC/RJ. 160p.
- Varnes, D. J. (1978), Landslides Types and Processes. In Landslides and Engineering Practice. E. B. Eckel (ed). Special Report n° 29, Highway Research Board, p.20-47.

Varnes, D. J. (1984), Landslide Hazard Zonation: a review of principles and practice.
Comission on Landslides of IAEG, UNESCO, Natural Hazards n° 3. 61p.

Vasconcellos, S. (1977), Vila Rica, formação e desenvolvimento. Editora Perspectiva.
São Paulo. 214p.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

- ABGE (1983), Métodos para descrição quantitativa de descontinuidades em maciços rochosos. Tradução nº 12. 122p. São Paulo.
- Alkmim, F. F.; Quade, H.; Evangelista, M. T. R. (1989), Sobre a história da deformação dos metassedimentos do Supergrupo Minas e Itacolomi no Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais.
- Barbosa, O. (1949), Contribuição à geologia do centro de Minas Gerais. Min. e Met. 14(79):3-19.
- Bishop, A. W. (1955), The use of the slip circle in the stability analysis of earth slope. Geotechnique. Vol. 5. 7.17p.
- Bromhead, E. N. (1999), The Stability of Slopes. E & FN Spon. 2nd Edition. London 230p.
- Castelo, R. R.; Polido, U. F. (1986), As encostas urbanas. Vitória-ES. UFES. 86p.
- Chapadeiro, E. C. (1995), Aplicação de classificações geomecânicas e de análises cinemáticas na avaliação da estabilidade de taludes da Formação Cercadinho em Belo Horizonte-MG. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 201p.
- Cunha, M. A. (1991), Ocupação de encosta, Instituto de Pesquisas Tecnológica de São Paulo. IPT.
- Dobereiner, L. (1987), Geotecnia de arenitos brandos. ABGE. Síntese de tese 08. .52p.
- Eschewege, W. L. V. (1833), Ergebnisse Forshungen Minas Gerais, Brasilien. N. JB. Geol. Min. Palzont., Stuttgart. 2403p.
- Evangelista, H. J. (1999), Microestruturas de rochas metamórficas. Departamento de Geologia. Escola de Minas . Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto-MG. 31p.

- Figueiredo, A . L. C. (1996), Caracterização geomecânica do maciço de fundação do UHE Tijuco Alto (rio ribeira – SP/PR). Dissertação de Mestrado apresentado na Escola de Engenharia de São Carlos/USP-SP.
- Gomes, R. C.; Araújo, L. G.; Bonuccelli, T. J.; Sobreira, F. G. (1998), Condicionantes Geotécnicos do espaço urbano da cidade de Ouro Preto/MG, XI COBRAMSEG, Congresso brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília/DF, Vol. IV, p. 1912-1919.
- Guerra, A . J. T.; Cunha, S. B. da. (1996), Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro-RJ. BCD União de Editoras S.A.
- Guerra, A . J. T.; Cunha, S. B. da. (1998). Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro/RJ. BCD União de Editoras S.A.
- Gusmão Filho, I. A. (1984), Estudo de encostas em áreas urbanas – IV Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Belo Horizonte-MG.
- Hasui, Y.; Mioto, J. A. (1992), Geologia estrutural aplicada. ABGE. São Paulo-SP
- Head, K. H. (1994), Manual of soil laboratory testing. Second edition. London. British Library cataloguing in publication data.
- Johnson, R. B.; Graff, J. V. (1988), Principles of engineering geology. John Wiley. Singapore. 495p
- Kirkaldier, L.; Ohio, C. (1988), American Society for Testing and Materials ASTM. Rock classification systems for engineering purposes. 167p.
- Ladeira, F. L. (1980), A mecânica das rochas. Ouro Preto –MG. UFOP. 91p.
- Lana, M. S.; Gripp, M. F. A.; Gripp, A . H. (1997), Aplicação da análise cinemática de blocos rígidos para identificação de mecanismos de ruptura em taludes. Vol. 1 p. 389-396
- Leme, R. A. S. (1987), Métodos atuais de estabilização de taludes. São Paulo – SP.
- Loczy, L. de; Ladeira, E. A . (1976), Geologia estrutural e introdução à geotectônica. São Paulo – S.P. Editora Edgard Blucher Ltda

- Menezes, M. S. (1978), Problemas de estabilidade das encostas da cidade de Salvador-BA. 85p.
- Nonato, C. A . (1994), Utilização de classificação de maciços rochosos no estudo da estabilidade de taludes pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG. Dissertação de Mestrado apresentada na UFMG/MG.
- Penteado, M. M. (1983), Fundamentos de geomorfologia. IBGE. Rio de Janeiro/RJ. 186p. XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG, 1998. Brasília-DF. V 1, 2. pp. 81-87;365-370;1297-1304; 1315-1322; 1335-1342.
- Yassuda, C. T.; Wolle, C. M.; Cordeiro, E. B.; Cruz, P. T.; Hachioh, W. C. . (1988), Estabilidade de encostas-encontro técnico da ABMS.
- Zenóbio, A. A. (1998), O emprego de classificações geomecânicas na análise de movimento de massa gravitacionais em encosta naturais. Revisão Bibliográfica. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 77p.

A N E X O S

ANEXO 1 – FICHA DE CAMPO

Levantamento de campo da Encosta do Morro do Curral

Data:

Setor nº

Dimensões do Talude no setor; Largura na base: altura: Orientação:

Litologia da rocha:

Coerência da rocha:

Grau de alteração:

Resistência:

Talude da encosta: Largura na base: altura: Orientação:

Orientação das Descontinuidades:

F1-foliação:

F1.1

F1.1

F1.1

F1.1

F2-trincas:

F2.1

F2.1

F2.1

F2.1

F2.1

F2.1

F2.1

F3-falhas

F3.1

F3.1

F3.1

F3.1

F3.1

Data:

Setor nº

Família F

Espaçamento:(m)

>2

2-1

1-0,50

0,50-0,20

<0,20

Persistência:(m)

>20

20-10

10-5

5-1

1-0,50

<0,50

Percolação: Seco:

Úmido:

Transpiração:

Gotejamento:

Filete:

Jorro:

Abertura: (cm)

>1,0

1,0-0,50

0,50-0,20

0,20-0,10

0,10-0,05

<0,05

Preenchimento:

Rugosidade Micro:

Com degraus- I- Irregular:

Com degraus- II - Lisa:

Com degraus- III-Polida com estria recortada:

Ondulada- IV- Irregular:

Ondulada- V – Lisa:

Ondulada- VI – Polida com estria ondulada:

Plana- VII – Irregular:

Plana- VIII – Lisa:

Plana- IX – Polida com estria plana:

Rugosidade Macro:

Com degraus- I- Irregular:

Com degraus- II - Lisa:

Com degraus- III-Polida com estria recortada:

Ondulada- IV- Irregular:

Ondulada- V – Lisa:

Ondulada- VI – Polida com estria ondulada:

Plana- VII – Irregular:

Plana- VIII – Lisa:

Plana- IX – Polida com estria plana: