



Ministério da Educação e do Desporto  
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto  
Departamento de Engenharia de Minas  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral



# **COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO E MECANISMOS DE RUPTURA EM ROCHAS BRANDAS MINA CÓRREGO DO SÍTIO**

Autor: Manoel da Conceição Lopes

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Milene Sabino Lana

Co-orientador: Prof. Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro

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

Área de concentração: Lavra de Mina.

Ouro Preto  
Julho de 2006

L864c      Lopes, Manoel da Conceição.  
Comportamento geotécnico e mecanismos de ruptura em rochas brandas Mina Córrego do Sítio [manuscrito]. / Manoel da Conceição Lopes. – 2006.  
94 f.: il.; color.; graf. ; tabs.; mapas.

Orientadora: Profa. Dra. Milene Sabino Lana.  
Co-orientador: Prof. Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral.  
Área de concentração: Lavra de Minas.

1. Rochas - Teses. 2. Metassomatismo (Mineralogia) - Teses. 3. Mecânica do solo - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. II. Título.

622.27

Catálogo: [sisbin@sisbin.ufop.br](mailto:sisbin@sisbin.ufop.br)

**DEDICATÓRIA:**

**Dedico esta dissertação ao Sr. Luiz  
Lopes, meu pai e a Sra. Nilda Ramos  
Lopes, minha mãe que sempre estiveram  
ao meu lado.**

## AGRADECIMENTOS

---

Em primeiro lugar agradeço a Deus, em quem encontrei forças para a realização deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Milene Sabino Lana, minha orientadora, pelo apoio e sugestões sempre oportunas.

Ao Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro pelo auxílio nos trabalhos de laboratório.

Ao Prof. Rodrigo Peluci Figueiredo pelas sugestões sempre oportunas.

Aos colegas de pós. Em especial: Pedro Amade, José Maria, Maíra , Danielle, Flávia, Èrica, Fernanda, Alyson, Jardel e Eduardo.

Aos amigos e amiga: João Bosco, Brasileu, Deilton, Alexandre, Milton e Carolina  
Ao Engenheiro Geólogo Ubirajara Campos do Amaral pelo apoio nos trabalhos de campo.

À Anglo Gold Ashanti pela oportunidade dada para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, pelo auxílio financeiro.

Aos professores e funcionários do DEMIN/EM.

## RESUMO

---

Este trabalho apresenta o estudo de filitos na Mina Córrego do Sítio, do Grupo Anglo Gold Ashanti, situada a aproximadamente 20km do município de Santa Bárbara-MG. Os resultados de análise mineralógica, propriedades físicas e ensaios de cisalhamento direto de três áreas desta Mina (Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina ) são apresentados e discutidos.

A evolução do estado de alteração dessas rochas foi investigada a partir de ensaios de alterabilidade. Não apenas uma análise qualitativa da influência do intemperismo no comportamento de rochas brandas é apresentada, mas também uma avaliação quantitativa, através da determinação da perda de massa percentual ao final do ensaio, variação das propriedades físicas e queda de resistência com o ensaio de ciclagem água-estufa.

Com o objetivo de analisar os fenômenos de ruptura ocorridos na Cava Cachorro Bravo realizou-se um estudo computacional, por meio do programa *Phase<sup>2</sup>*, enfatizando a ruptura por flambagem ocorrida nesta área. Por meio desta análise também se determinou a possível superfície de ruptura.

Duas áreas estudadas apresentam comportamentos distintos: enquanto na Cava Cachorro Bravo tem-se um maciço mais alterado e mais susceptível à ruptura, na Cava Crista a acentuada rugosidade presente na superfície de xistosidade confere-lhe maior resistência.

**Palavras-Chave:** rochas brandas, caracterização geotécnica, alterabilidade, ruptura por flambagem.

## ABSTRACT

---

This work introduces the study of phyllites in Corrego do Sitio Mine, Anglo Gold Ashanti Group, which is located about 20km of Santa Barbara city, MG. The result of mineralogical analysis, physical properties and direct shear tests of three area of this mine (Crista pit, Cachorro Bravo pit and Cristina pit) are presented and discussed.

The weathering level evolution of these rocks was investigated through weathering tests. Not only a qualitative analysis of the weathering influence on the behavior of weak rocks is presented, but also a quantitative evaluation, through determination of percentage loss of mass, physical properties variation and decrease strength with the tests drying and wetting cycles.

In order to analyse the phenomenon of the failure occurred in Cachorro Bravo pit a computer study was carried out, through *Phase<sup>2</sup>*, with emphasis in the buckling occurred in this area. Through of this analysis it was also determined the probable failure surface.

Two areas have different behavior: while in the Cachorro Bravo pit the rock mass is more weathered and prone to failure, in the Crista pit hard roughness present in the schistous surface of the rocks give them more strength.

**Keywords:** weak rocks, geotechnical characterization, alterability, buckling.

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 – ASPECTOS GERAIS DA ÁREA A SER ESTUDADA-MINA CÓRREGO DO SÍTIO.....	2
1.2.1- Informações Gerais.....	2
1.2.2- Geologia Local.....	4
1.3 – OBJETIVOS .....	6
1.4 – ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	7

## CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – INTEMPERISMO .....	8
2.1.1 – Intemperismo Físico.....	11
2.1.2- Intemperismo Químico.....	12
2.2 – CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS .....	14
2.2.1- Litologia.....	15
2.2.2- Coerência.....	15
2.2.3- Descontinuidades.....	17
2.2.4- Alteração.....	18
2.2.4.1- Ensaio de Alterabilidade Acelerada.....	22
2.3 – MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	25
2.3.1- Método dos Elementos Finitos.....	27
2.4 – MECANISMOS DE RUPTURA. ....	30
2.5-CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA DE DESCONTINUIDADES.....	39
2.5.1 – Critério de Mohr- Coulomb.....	40
2.5.2. – Critério de Ruptura de Patton.....	40
2.5.3 – Critério de Barton-Bandis .....	42

## **CAPÍTULO 3 METODOLOGIA**

3.1 – ESTRUTURAÇÃO .....	44
3.2 – AMOSTRAGEM .....	44
3.3 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	45
3.3.1- Caracterização Mineralógica.....	45
3.3.2- Comportamento Geotécnico.....	45
3.3.3- Ensaio de Cisalhamento Direto.....	46
3.3.4- Ensaio de Alterabilidade Acelerada (ciclagem água-estufa).....	49
3.4 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE. ....	50

## **CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

4.1 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA .....	52
4.2 – COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO .....	56
4.2.1- Índices Físicos.....	56
4.2.2- Ensaio de Cisalhamento Direto.....	57
4.3 – ENSAIO DE ALTERABILIDADE ACELERADA (ciclagem água-estufa).....	66
4.4 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE. ....	74

## **CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....84**

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....87**

### **ANEXO I- ANÁLISE MINERALÓGICA**

MICROSCOPIA ÓPTICA  
DIFRATOMETRIA RX

### **ANEXO II- ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO**

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela1:</b> Relação entre o clima e a decomposição das rochas (Hunt,1984).....	11
<b>Tabela2:</b> Classificação das rochas quanto ao grau de coerência (Guidicini e Nieble,1984).....	16
<b>Tabela 3:</b> Classificação de campo da resistência dos materiais rochosos e correlação com a resistência à compressão uniaxial (ISRM,1981).....	17
<b>Tabela 4:</b> Graus de Alteração (ISRM, 1981).....	20
<b>Tabela 5:</b> Índice de Alterabilidade -I <sub>s</sub> (Sadisun <i>et.al</i> ,2005).....	24
<b>Tabela 6:</b> Análise petrográfica das lâminas delgadas.....	52
<b>Tabela 7:</b> Constituintes mineralógicos presentes no filito.....	55
<b>Tabela 8:</b> Índices Físicos das Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina.....	56
<b>Tabela 9:</b> Perda de massa em amostras da Cava Crista.....	67
<b>Tabela 10:</b> Perda de Massa (%) das amostras da Cava Crista.....	68
<b>Tabela 11:</b> Perda de massa em amostras da Cava Cachorro Bravo.....	70
<b>Tabela 12:</b> Perda de massa (%) das amostras da Cava Cachorro Bravo.....	70
<b>Tabela 13:</b> Perda de massa em amostras da Cava Cristina.....	72
<b>Tabela 14:</b> Perda de massa (%) das amostras da Cava Cristina.....	74

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 1:</b> Mapa de localização da Mina Córrego do Sítio .....	3
<b>Figura 2:</b> Cava Cachorro Bravo.....	5
<b>Figura 3:</b> Cava Crista.....	6
<b>Figura 4:</b> Efeitos da taxa de intemperismo no maciço rochoso (Watters,1997).....	9
<b>Figura 5:</b> Perfil de intemperismo (Vaz,1996) .....	9
<b>Figura 6:</b> Influência do grau de alteração na resistência mecânica das rochas (Fiori e Carmignari,2001) .....	21
<b>Figura 7:</b> Modelo de Elementos finitos (Brady & Brown, 1985).....	28
<b>Figura 8:</b> Tombamento Flexural (Hoek & Bray,1981) .....	31
<b>Figura 9:</b> Tombamento de Blocos (Hoek & Bray,1981).....	32
<b>Figura 10:</b> Tombamento de Blocos por Flexão (Hoek & Bray,1981).....	32
<b>Figura 11:</b> Tombamento Secundário (Hoek & Bray,1981).....	34
<b>Figura 12:</b> Talude em um maciço foliado (Adhikary <i>et. al</i> ,2001).....	35
<b>Figura 13:</b> Análise de ruptura por flambagem (Goodman,1989).....	36
<b>Figura 14:</b> Ábaco para taludes rochosos foliados para o caso descontinuidades com ângulo de atrito de 0,10,20 e 30° (Adhikary <i>et.al</i> , 2001).....	38
<b>Figura 15:</b> Lei de Patton para a resistência ao cisalhamento da descontinuidade (Azevedo e Marques, 2002).....	41
<b>Figura 16:</b> Critério de Resistência bi-linear (Goodman,1989).....	42
<b>Figura 17:</b> Prensa de Cisalhamento Direto a ser utilizada na execução dos ensaios.....	47
<b>Figura 18:</b> Relação entre a variação da altura (mm) versus raiz de t ( $\text{min}^{0,5}$ ).....	48
<b>Figura 19:</b> Clivagem de Crenulação (Cava Crista).....	53
<b>Figura 20:</b> Sub-grãos de quartzo (Cava Cachorro Bravo).....	54
<b>Figura 21:</b> Bandamento resultante da variação da proporção de quartzo e mica (Cava Cristina).....	55
<b>Figura 22:</b> Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal.....	58
<b>Figura 23:</b> Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal.....	59
<b>Figura 24:</b> Amostra da Cava Crista cisalhada.....	60
<b>Figura 25:</b> Envoltória de Resistência (Cava Crista).....	61

<b>Figura 26:</b>	Detalhe do bloco da Cava Cachorro Bravo.....	62
<b>Figura 27:</b>	Envoltória de Resistência para a Cava Cachorro Bravo.....	63
<b>Figura 28:</b>	Envoltória de Resistência para a Cava Cristina.....	65
<b>Figura 29:</b>	Representação da perda de massa por ciclo da Cava Crista.....	68
<b>Figura 30:</b>	Blocos da Cava Crista após 30 ciclos.....	69
<b>Figura 31:</b>	Representação da perda de massa por ciclo da Cava Cachorro Bravo.....	69
<b>Figura 32:</b>	Blocos da Cava Cachorro Bravo após 20 ciclos de umedecimento e secagem em estufa.....	71
<b>Figura 33:</b>	Representação da perda de massa por ciclo da Cava Cristina.....	73
<b>Figura 34:</b>	Blocos da Cava Cristina após 30 ciclos.....	73
<b>Figura 35:</b>	Ruptura ocorrida na Cava Cachorro Bravo.....	75
<b>Figura 36:</b>	Mapa Geológico da Cava Cachorro Bravo e extensão da área de ruptura..	76
<b>Figura 37:</b>	Ruptura por flambagem ocorrido na Cava Cachorro Bravo.....	77
<b>Figura 38:</b>	Modelo computacional para a análise.....	78
<b>Figura 39:</b>	Possível superfície de ruptura.....	81
<b>Figura 40:</b>	Ruptura por flambagem.....	82
<b>Figura 41:</b>	Região de tracionamento.....	82

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO

É comum em regiões de clima tropical úmido encontrar perfis de intemperismo, com diversos materiais de transição entre rocha sã e solo residual. A ação intempélica provoca alterações no comportamento mecânico dos materiais.

A ação do intemperismo no comportamento geotécnico das rochas brandas e a complexidade geológico-estrutural dos maciços rochosos são os principais desencadeadores dos problemas geotécnicos. A velocidade da ação dos processos intempélicos está ligada ao clima da região, ao tempo de exposição e ao relevo. Além disso, se o maciço rochoso apresentar alto grau de fraturamento, haverá um caminho preferencial para a entrada da água segundo as fraturas, acarretando a aceleração do processo de alteração.

No Quadrilátero Ferrífero, o estudo da influência do intemperismo sobre os maciços rochosos é de grande relevância devido à presença de rochas metamórficas deformadas, com descontinuidades estruturais e espessos perfis de alteração.

Os estudos envolvendo a influência do intemperismo no comportamento de rochas brandas quase sempre são qualitativos. Neste trabalho procura-se quantificar o problema.

Embora exista uma grande variedade de rochas brandas no Brasil, pouco se conhece sobre seu comportamento geomecânico. Grande parte dos dados disponíveis refere-se a rochas sãs ou pouco alteradas.

Esta carência de informações referentes a essas rochas deve-se muitas vezes a dificuldades na preparação das amostras para a realização dos ensaios em laboratório. A heterogeneidade apresentada por estas rochas também contribui para a carência de dados de propriedades físicas e mecânicas. Também a falta de uma metodologia adequada aplicável à caracterização geotécnica de rochas alteradas, por serem de baixa resistência, é outro fator que compromete a determinação da resistência mecânica.

Neste trabalho estudaram-se a alterabilidade e resistência das rochas (filitos) presentes na Mina Córrego do Sítio, do Grupo Anglo Gold Ashanti situada a aproximadamente 20 km do município de Santa Bárbara-MG. A Mina Córrego do Sítio é constituída por frentes

de lavra de minério oxidado de ouro, denominadas Lajeado, Crista, Cachorro Bravo, Cristina, Carvoaria Velha, Mutuca, Rosalino, Grota Funda.

A velocidade de alteração dessas rochas foi investigada a partir de ensaios de alterabilidade.

A resistência ao cisalhamento paralela à superfície de xistosidade foi determinada em laboratório, procurando-se estabelecer diferenças de comportamento observadas em áreas distintas da mina.

No caso das rochas da Mina Córrego do Sítio, a ocorrência de dobramentos, fraturamento acentuado em algumas áreas e o clima tropical úmido, conduziu à formação de rochas com baixa resistência em determinados locais. Diante disso, a caracterização do comportamento geotécnico dessas rochas e também o estudo da influência da alterabilidade, através da realização de ensaios de laboratório, vêm apontar alternativas para estudos geotécnicos envolvendo os taludes de mina.

Sabendo-se que o processo de alteração, resultante dos processos de intemperismo afeta a estabilização de taludes, este estudo é fundamental no sentido de gerar parâmetros mais realistas para as análises de estabilidade.

O estudo dos mecanismos de instabilização dos taludes da Cava Cachorro Bravo foi abordado, procurando um melhor entendimento dos fenômenos de ruptura ocorridos neste local.

## **1.2 ASPECTOS GERAIS DA ÁREA A SER ESTUDADA – MINA CÓRREGO DO SÍTIO**

### **1.2.1 Informações Gerais**

A Mina Córrego do Sítio, pertencente ao Grupo Anglo Gold Ashanti, situa-se a aproximadamente 20 km da cidade de Santa Bárbara-MG. Seu acesso é feito através da MG-436, distante aproximadamente 120 km de Belo Horizonte (Figura 1).

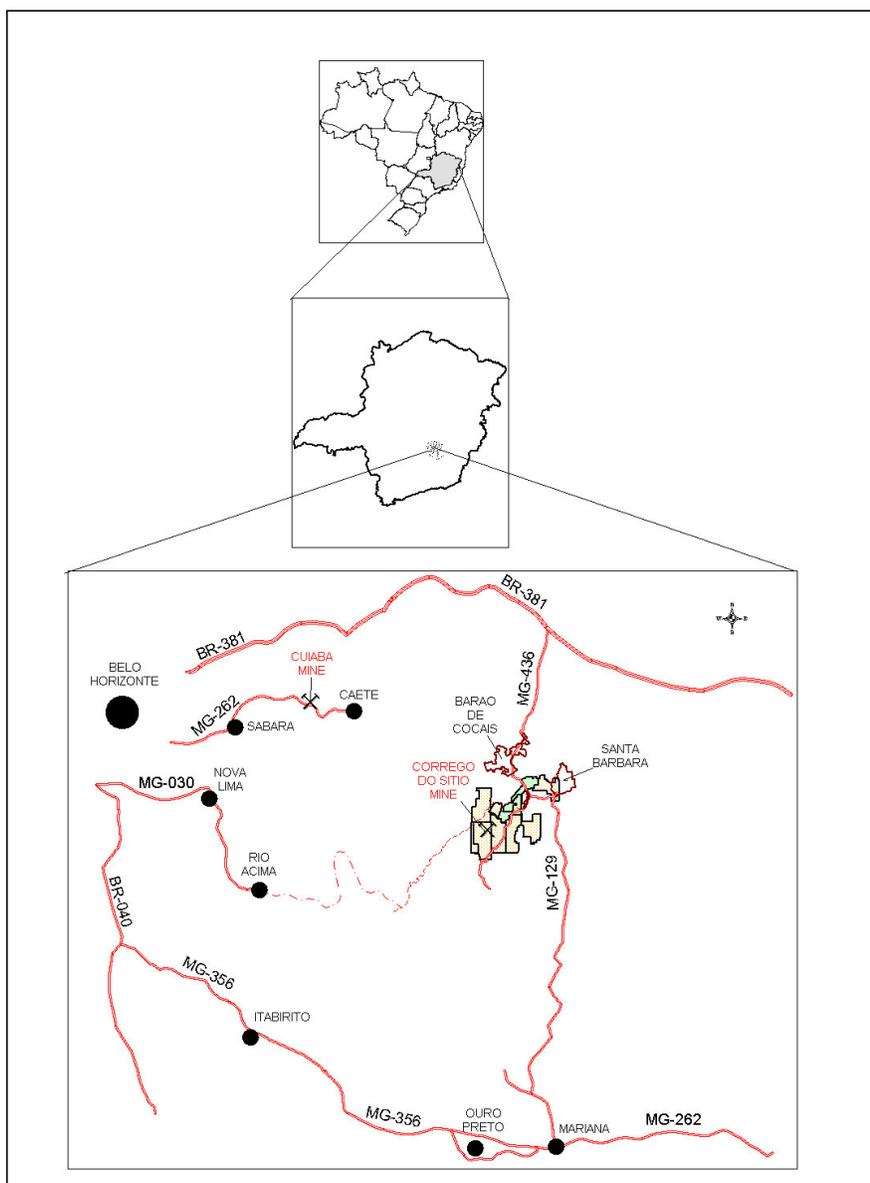


Figura 1- Mapa de Localização da Mina Córrego do Sítio (Anglo Gold Ashanti).

A área em estudo encontra-se inserida na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero, em área drenada pela bacia do rio Doce. O córrego do Sítio é afluente da margem esquerda do Córrego Caraça, que por sua vez, é afluente da margem direita do rio Conceição.

As cavas e pilhas de lixiviação da Mina Córrego do Sítio encontram-se entre o rio Conceição e o Córrego do Sítio.

Após a extração, o minério é levado até a unidade de britagem, sendo depois de britado, classificado. O material é disposto em pilhas, e lixiviado por solução cianetada para extração do ouro.

A solução rica é recolhida em tanque devidamente impermeabilizado, localizado ao lado da pilha. A extração final do ouro é feita na usina metalúrgica.

### **1.2.2 Geologia Local**

As rochas da Mina Córrego do Sítio ocorrem em uma seqüência vulcanossedimentar arqueana, pertencente ao Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima e estão sobrepostas, regionalmente, às rochas vulcânicas ultrabásicas. Predominam filitos cloríticos, localmente quartzosos ou sericíticos, com níveis carbonosos, associados a xistos quartzo-micáceos, às vezes caulínicos.

Como resultado da alteração hidrotermal, tem-se a presença de zonas de seritização e carbonatação nestas rochas.

As zonas de cisalhamento são caracterizadas pela presença de quartzo, carbonato e sulfeto nos metapelitos. O material carbonoso ocorre dentro, bem como fora da zona cisalhante mineralizada. (Espada, 2003).

Na área da Mina Córrego do Sítio estão presentes três famílias principais de descontinuidades denominadas J, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub>.

A família J (N20W/30S) ocorre perpendicular à foliação, com espaçamento variando de métrico a centimétrico. A família S<sub>2</sub> ocorre paralela à foliação (N35S/70SE), com espaçamento de centimétrico a milimétrico. Nesta direção estão presentes zonas de cisalhamento. A família S<sub>3</sub> (N60E/40NW) apresenta espaçamento variando de centimétrico a milimétrico.

As mineralizações auríferas estão encaixadas em sericita filito e sericita-grafita filito, com freqüentes intercalações de meta-vulcânica ácida, que são representadas por quartzo-sericita xisto caulínico.

No minério oxidado encontra-se pirita disseminada, limonitizada. Enquanto no minério sulfetado existem cristais de pirita fina, pouco intemperizada. Ainda destacam-se rochas intrusivas na forma de diques de composição básica. Os diques tendem a aflorar em saprólitos ricos em argila, os quais possuem uma cor alaranjada peculiar, conferida pelo óxido de ferro que associado à carência de quartzo, no saprólito, reflete a composição

máfica a intermediária dos diques (Espada, 2003). Ainda segundo este autor, pelo menos uma das margens dos diques é vermelha, ao invés de alaranjada. Esta cor reflete a reunião de uma alteração hidrotermal ou metessomática formando clorita, carbonatos ferrosos e pirita.

Com relação às áreas a serem estudadas, ressalta-se:

- Cava Cachorro Bravo: esta área é constituída por filitos ricos em quartzo, sericita, material carbonoso, carbonato oxidado e sulfetos limonitizados (arsenopirita, pirita, pirrotita, bertherita e estibinita). Além disso, encontra-se presente dique básico constituído de carbonato e anfibólio (Figura 2).
- Cava Crista: esta cava apresenta intensa silicificação, carbonatação, seritização e sulfetação (Figura 3).
- Cava Cristina: encontra-se na zona de contato de filitos/xistos carbonosos com filitos/xistos sericíticos mais ou menos quartzosos.



Figura 2- Cava Cachorro Bravo



Figura 3- Cava Crista

### 1.3 OBJETIVOS

Este trabalho visa contribuir com o levantamento de dados para a caracterização geotécnica de rochas brandas e o estudo da influência do intemperismo em seu comportamento mecânico.

Como objetivos específicos do trabalho, destacam-se:

- a obtenção de parâmetros geotécnicos realistas para utilização em projetos de engenharia, especialmente as propriedades físicas e mecânicas das rochas selecionadas para estudo;
- o estudo da influência da alterabilidade no comportamento geotécnico das rochas selecionadas, através da realização de ensaios de alterabilidade acelerada e;
- análise das condições de estabilidade dos taludes com o estudo dos mecanismos de rupturas na Cava Cachorro Bravo.

## **1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO**

O trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos e 2 anexos.

O capítulo 1- “Introdução”- Introduce o tema, fornece os objetivos do trabalho e considerações a respeito da área estudada.

O capítulo 2- “Revisão Bibliográfica”- Apresenta uma pesquisa sobre: intemperismo, caracterização dos maciços rochosos, ensaios de alterabilidade, métodos de análise de estabilidade de taludes, mecanismos de ruptura e critérios de resistência de descontinuidades.

O capítulo 3- “Metodologia”- Descreve os procedimentos adotados para a realização dos trabalhos de campo, laboratório e análises de estabilidade.

O capítulo 4- “Resultados e Discussões”- Apresenta e discute os resultados obtidos.

O capítulo 5- “Conclusões e Sugestões”- Salienta aspectos essenciais do trabalho e propõe sugestões para trabalhos futuros.

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 INTEMPERISMO

A exposição das rochas à atmosfera, devido à erosão, aos movimentos tectônicos, ao vulcanismo, coloca-as diante de forças e reagentes diferentes daqueles que existem em seu ambiente de formação (Azevedo e Marques, 2002).

O intemperismo pode ser entendido como todas as mudanças de natureza física e química que ocorrem na rocha em resposta a sua interação com o ambiente e que modifica as características de deformabilidade, resistência e permeabilidade das rochas (Menezes, 1988, Marques, 1992 *apud* Marques *et. al*, 2004). Na Figura 4 é apresentado o efeito do intemperismo no espaçamento, aberturas de descontinuidades, permeabilidade e tamanho das partículas.

O estudo do intemperismo reveste-se de grande importância, pois muitas das obras de engenharia encontram-se próximas à zona de intemperismo onde os agentes intempéricos afetam as propriedades das rochas, alterando-as.

O efeito da alteração normalmente é maior próximo à superfície. Em regiões de clima tropical úmido é comum a existência de grandes espessuras de solos residuais provenientes do processo de intemperismo, como mostrado na Figura 5.

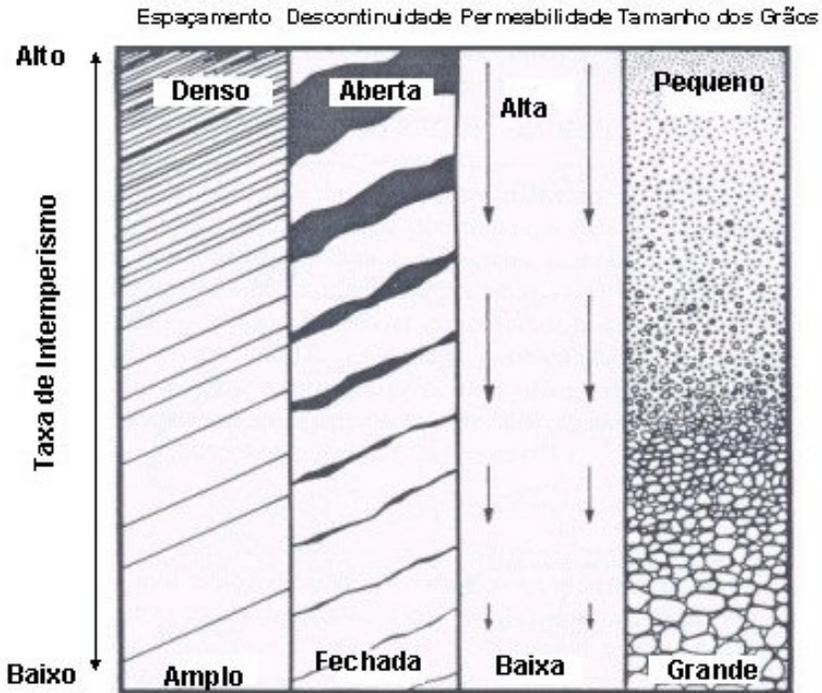


Figura 4 – Efeitos da taxa de intemperismo no maciço rochoso (Watters, 1997)

CLASSIFI- CAÇÃO	CLASSES	PERFIL DE INTEMPERISMO	PROCESSOS	MÉTODOS DE		COMPOR- TAMENTO
				ESCAVAÇÃO	PERFURAÇÃO	
SOLO RESIDUAL	SOLO VEGETAL		PEDOLÓGICOS	LÂMINA DE AÇO ("SCRAPER", ENXADÃO, FACA) 1ª	A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM ↓ IMPENETRÁVEL AO SPT	HOMOGÊNEO ISOTRÓPICO
	SOLO DE ALTERAÇÃO (SA) saprolito		INTEMPÉRICOS QUÍMICOS			A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM ↓ IMPENETRÁVEL A LAVAGEM POR TEMPO
ROCHA	ROCHA ALTERADA MOLE (RAM)		INTEMPÉRICOS QUÍMICOS	ESCARIFICADOR (PICARETA) 2ª	A PERCUSSÃO COM TRADO OU LAVAGEM ↓ IMPENETRÁVEL A LAVAGEM POR TEMPO	DEPENDENTE DO TIPO DE ROCHA
	ROCHA ALTERADA DURA (RAD)		INTEMP. FÍSICOS	EXPLOSIVO 3ª		
	ROCHA SA (RS)		INCIPIENTES OU AUSENTES			

Figura 5– Perfil de Intemperismo (Vaz, 1996).

De acordo com Azevedo e Marques (2002) os principais fatores que controlam o intemperismo são:

- Tipo de rocha: cada rocha tem uma mineralogia característica que reage de maneira distinta ao intemperismo.
- Inclinação da encosta: nos taludes mais íngremes, as chuvas transportam o material intemperizado para o pé do talude, expondo a rocha sã ao ataque intempérico.
- Clima: nas regiões de clima tropical o intemperismo químico é mais intenso já que as reações químicas são aceleradas. Nas regiões de climas secos e frios predomina o intemperismo físico.
- Tempo de ação do processo: o tempo necessário para a decomposição de uma rocha sã varia de acordo com o tipo de clima e composição da rocha.

Em ambientes quentes e úmidos, a atuação do intemperismo químico torna-se mais severa em relação a ambientes frios e secos.

A relação entre o clima e o intemperismo no processo de decomposição das rochas é apresentada pela Tabela 1.

Segundo Watters (1997), os processos de intemperismo físico e químico são fortemente interdependentes. Muitas vezes a ação de um tende a facilitar a atuação do outro.

Da mesma forma que o intemperismo químico desenvolve-se a partir de fraturas apresentadas pelas rochas, também o intemperismo físico pode resultar das mudanças de volume e enfraquecimento provocadas pelo intemperismo químico.

Tabela 1- Relação entre o clima e a decomposição das rochas (Hunt,1984)

Clima	Intemperismo	Atividade
Frio-seco	Forte intemperismo físico	Temperaturas baixas causam o colapso da rocha.
Frio-úmido	Moderado intemperismo químico associado ao intemperismo físico.	Decomposição do material orgânico associada à alteração da rocha matriz causa a decomposição da rocha.
Quente-úmido	Forte intemperismo químico	Alta umidade e altas temperaturas aceleraram a decomposição da rocha.
Úmido	Intemperismo químico	A movimentação da água conduz a remoção de sais solúveis e outros minerais.
Alternância: úmido-seco	Ação intempérica retardada	O movimento da água pode ser ascendente durante o período seco, concentrando e fixando óxidos e hidróxidos de ferro, que resultam eventualmente em uma barreira contra o movimento descendente de água e retardando a decomposição abaixo da zona de laterização.
Quente-seco	Ação intempérica mínima	Atividade química e mecânica muito lenta.

### 2.1.1 Intemperismo Físico

No intemperismo físico, a degradação da rocha acontece sem que haja significativa alteração na composição química e mineralógica. Com o intemperismo físico aumenta-se a área de superfície disponível para a ação do intemperismo químico.

Vários são os processos que caracterizam o intemperismo físico. Podendo ser destacados:

- Diaclasamento: o qual, segundo Maciel Filho (1997), pode conduzir ao fraturamento da rocha através de variações diárias ou sazonais de temperatura.

- Ação do Congelamento: típico de regiões glaciais, a água ao penetrar por uma determinada fratura congelará provocando um aumento de volume, alargando esta fratura.
- “Slaking”: envolve alternância de umedecimento e secagem.
- Cristalização dos Sais: típico de regiões áridas onde os sais não são removidos pela água da chuva, sendo então, transportados para a superfície concentrando-se nas fendas das rochas. Ao cristalizarem ocorre um aumento de volume, surge uma força expansiva o que acarreta a desagregação das rochas. Este processo é comentado por Cánton *et.al* (2001).

O fenômeno de “slaking”, como já foi citado, envolve ciclos alternados de umedecimento e secagem levando ao fendilhamento em grande escala e a completa desintegração da rocha. Neste processo, pode ocorrer a hidratação dos minerais expansivos. Este processo é característico de regiões de clima tropical úmido, onde a elevada umidade associada a altas temperaturas e insolação direta acelera a alteração das rochas, influenciando no enfraquecimento do material, reduzindo sua resistência. Desta forma, a desintegração física controla a decomposição química. O processo de desintegração inicia-se através de microfraturas, levando a redução do material em fragmentos.

Dentre os processos listados acima, a alternância de umedecimento e secagem é destacada neste trabalho.

### **2.1.2 Intemperismo Químico**

No intemperismo químico, o maciço rochoso está sob a ação de substâncias dissolvidas na água, tais como oxigênio, dióxido de carbono e ácidos, causando a conversão de silicatos, sulfetos, por exemplo, em novos compostos como hidróxidos, sulfatos, carbonatos, alguns dos quais solúveis (Hunt, 1984).

O intemperismo químico caracteriza-se pela modificação da composição química e mineralógica da rocha sã, sendo os produtos da decomposição: minerais secundários.

Goodman (1993) destaca que o intemperismo químico é fortemente influenciado pela disponibilidade de precipitação suficiente para lixiviar os materiais. O autor ainda comenta que a rocha com pouco ou nenhum quartzo poderá apresentar como produto final do

intemperismo material argiloso ou silteoso, se o clima e a precipitação em excesso favorecer a decomposição.

A presença de fraturas associada à presença de água e a constituição mineralógica podem determinar uma maior ou menor susceptibilidade das rochas a ação do intemperismo químico.

Dentre os tipos de reação química que as rochas podem sofrer destacam-se:

- 1) Hidrólise: os íons da água ao se combinarem com os minerais que constituem a rocha formam novos minerais devido à hidrólise. Os argilo-minerais representam produtos da hidrólise de aluminossilicatos.
- 2) Hidratação: representa a adição de água à composição de determinados minerais. Com a hidratação da anidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) forma-se gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ).
- 3) Dissolução: segundo a ABGE (1998), este fenômeno ocorre em diferentes intensidades, a depender do conteúdo de gás carbônico, acidez das soluções e da natureza dos minerais submetidos à alteração. Dentre aqueles minerais com maior facilidade de sofrerem dissolução estão os cloretos, sulfatos, carbonatos. Rochas ricas em calcita possuem alta solubilidade, a qual pode resultar em problemas de engenharia, tais como, subsidência de terreno, colapso de estruturas e comprometimento de aberturas subterrâneas. O carbonato de cálcio oriundo dos calcários é lentamente dissolvido pela água da chuva contendo dióxido de carbono, formando bicarbonato de cálcio.
- 4) Oxidação: a oxidação assume importância nos casos em que a pirita em presença de água forma ácido sulfúrico e óxido de ferro. Marques (1992) *apud* Lopes (2000) considera que a presença de ácido sulfúrico na água subterrânea pode conduzir à formação de minerais secundários, devido a reações deste ácido com carbonato de cálcio, argilo-minerais e íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ , levando a grandes expansões. A atuação do ácido removendo o material cimentante da rocha conduz ao seu enfraquecimento e eleva a porosidade.

Chigira e Oyama (1999) verificaram que existe uma zona de oxidação e outra de dissolução como resultado do intemperismo químico. Na primeira ocorre a oxidação da pirita formando ácido sulfúrico e óxido ou hidróxido de ferro, enquanto na segunda os minerais que compõem a rocha são dissolvidos pelo ácido gerado na zona de oxidação e lixiviados.

Hudec (1997) comenta que a dissolução, oxidação e hidratação são processos de intemperismo químico geralmente efetivos em rochas e minerais não-silicatados, enquanto a hidrólise pode ser considerada como principal processo de certos minerais silicatados formando argilo-minerais.

Do ponto de vista geotécnico (Johnson e De Graff, 1988) é preciso examinar a influência do intemperismo químico nas rochas em curto e longo prazo. Em curto prazo o processo intempérico pode criar problemas durante a execução de certas obras, seja em superfície ou sub-superfície, tais como túneis. Em longo prazo o intemperismo influenciará nas propriedades físicas e mecânicas da rocha em um determinado local.

## **2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS**

Os maciços rochosos são comumente heterogêneos, anisotrópicos, formados por blocos de rochas sobrepostos, apresentando uma matriz denominada rocha intacta e superfícies de descontinuidades que o compartimentam. Essa heterogeneidade e anisotropia apresentada pelos maciços conduzem a diferentes tipos litológicos, presença de descontinuidades e variados graus de alteração.

O maciço rochoso deve ser reconhecido como um material descontínuo, que pode ter propriedades diversas em pontos e direções diferentes. Não é um material fabricado, mas um material que foi freqüentemente submetido a ações mecânicas, térmicas e químicas ao longo de milhões de anos (Azevedo e Marques, 2002).

A caracterização de maciços visa à identificação de características das rochas e das descontinuidades para efeito de aplicação em problemas de engenharia de rochas.

Vaz (1996) ressalta que a presença de estruturas (fraturas, falhas, contatos, etc.) e as condições hidrogeológicas são fatores que governam as características dos maciços rochosos.

Neste processo de caracterização é importante que se quantifique as propriedades dos maciços rochosos, como salientado por Ojima (1982). Os ensaios e técnicas de caracterização são fundamentais na quantificação dessas propriedades.

Na caracterização do maciço rochoso as propriedades que interferem na qualidade do maciço, do ponto de vista da engenharia, associam-se basicamente a: litologia, coerência, descontinuidades e estado de alteração.

Este trabalho discute a influência do estado de alteração nas propriedades física e mecânica de rochas brandas.

### **2.2.1 Litologia**

O estudo da caracterização litológica tem como objetivo identificar a composição mineral, cor, textura, tamanho dos grãos e estruturas presentes na rocha.

Uma classificação litológica ou petrográfica, para aplicação em Engenharia deve apoiar-se em conceitos petrográficos de uso corrente na Geologia, porém, deve ser simplificada e objetiva, evitando-se nomenclaturas complexas, cujo emprego não proporcione resultados práticos (ABGE, 1998).

A identificação do tipo litológico pode fornecer informações importantes, como por exemplo, no caso de rochas calcárias alertando sobre a possibilidade de haver cavernas resultantes da dissolução.

As informações fornecidas pela caracterização litológica também contribuirão para a análise da influência do intemperismo sobre uma determinada rocha indicando uma maior ou menor susceptibilidade dos minerais constituintes frente ao intemperismo.

O padrão cromático das rochas está vinculado à sua composição mineralógica. A coloração negra ou verde escuro pode estar associada aos minerais de biotita, hornblenda, piroxênio, anfibólio e olivina. Rochas com considerável presença de feldspatos (ortoclásio e plagioclásio) possuem coloração clara, podendo variar de acinzentada, rosada a avermelhada (Costa, 2002).

### **2.2.2 Coerência**

A coerência é um índice de emprego tradicional no meio geológico, baseando-se em características físicas como: resistência ao impacto, resistência ao risco (dureza), friabilidade.

A descrição do grau de coerência permite comparar variedades de um mesmo litotipo, bem como avaliar de modo qualitativo a ação do intemperismo sobre as rochas e as conseqüentes modificações em suas propriedades mecânicas.

A Tabela 2 traz os critérios para a definição da coerência das rochas, bem como as denominações e siglas utilizadas.

Soares *apud* Vaz (1996) considera o grau de coerência subjetivo permitindo apenas a diferenciação entre rochas com resistência à compressão uniaxial inferior a 20MPa.

Tabela 2- Classificação das rochas quanto ao grau de coerência. (Guidicini e Nieble, 1984)

Rocha	Símbolo	Características
Muito coerente	C1	-Quebra com dificuldade ao golpe de martelo. -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. -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 do martelo. -Bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos. -Lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento.
Friável	C4	-Esfarela ao golpe do martelo. Desagrega sob pressão dos dedos.

Por outro lado, a ISRM (1981) recomenda uma classificação da resistência dos materiais rochosos correlacionando com a resistência à compressão uniaxial (Tabela 3).

Tabela 3- Classificação de campo da resistência dos materiais rochosos e correlação com a resistência à compressão uniaxial (ISRM, 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 por canivete.	1,0-5,0
R2	Rocha fraca	Pode ser raspada por canivete com dificuldade, marcada por firme pancada com a ponta do martelo.	5,0-25
R3	Rocha com resistência média	Não pode ser raspada por 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

### 2.2.3 Descontinuidades

A descontinuidade engloba qualquer feição geológica que interrompa a continuidade física de uma rocha, como por exemplo, zonas de fraqueza, falhas, na qual a resistência à tração é nula ou muito baixa (ISRM, 1981).

Nos maciços rochosos as descontinuidades podem ser totalmente responsáveis pela estabilidade, já que interferem de forma significativa na permeabilidade, deformabilidade e resistência.

Nos maciços rochosos é comum a ocorrência de numerosos tipos de superfícies de descontinuidade, propiciando variações bruscas nas propriedades físicas dos maciços. Estas superfícies distinguem-se não só pela sua origem e evolução, mas também pelas suas

dimensões, localização, propriedades mecânicas, frequência de ocorrência (Ojima,1998 *apud* Lopes, 2000).

Na descrição das características das descontinuidades devem-se considerar os seguintes parâmetros (ISRM, 1981):

- Orientação: representa a atitude da descontinuidade no espaço, descrita pelo rumo de mergulho (azimute) e pelo mergulho.
- Espaçamento: é a medida da distância perpendicular entre descontinuidades adjacentes.
- Abertura: distância medida perpendicularmente entre paredes adjacentes de uma descontinuidade, cujo interior encontra-se preenchido por água ou ar.
- Persistência: comprimento do traço de uma descontinuidade ao longo de um afloramento, representando a extensão da descontinuidade.
- Resistência da Parede: equivalente à resistência compressiva das paredes rochosas adjacentes de uma descontinuidade.
- Preenchimento: material que separa as paredes rochosas adjacentes é normalmente mais fracos que o material rochoso original, representados por areias, silte, argila, material de alteração intempérica.
- Tamanho do Bloco: dimensões do bloco rochoso resultantes da orientação das famílias de descontinuidades que se interceptam e de seu espaçamento.
- Percolação: fluxo de água em uma descontinuidade ou no maciço como um todo.
- Número de Famílias: define o sistema de descontinuidades.
- Rugosidade: expressa as ondulações presentes nas superfícies da descontinuidade, influenciando na resistência ao cisalhamento.

#### **2.2.4 Alteração**

Ojima (1982) define a alteração, sob o ponto de vista geotécnico, como o conjunto de modificações que conduzem à degradação das características mecânicas da rocha.

Gupta e Seshagiri Rao (1998) afirmam que o processo de alteração é seqüencial e degradacional caracterizado pela descoloração, presença de manchas, minerais secundários, mudanças texturais, desenvolvimento de vazios, redução da resistência e desintegração.

O processo de alteração leva a um enfraquecimento gradual do meio rochoso, o qual ocorre pela remoção dos elementos solúveis constituintes dos próprios minerais, pela dissolução dos elementos com função de cimentação em solos ou rochas, pelo desenvolvimento de uma rede de microfraturas em um meio rochoso que não as possuía (Guidicini e Nieble, 1984).

A caracterização do estado de alteração realiza-se de maneira qualitativa ou quantitativa. A caracterização qualitativa torna-se muito subjetiva e pouco adequada para fins de engenharia, já que esta consiste de uma avaliação visual da alteração dos minerais através de mudanças na cor, brilho e textura.

É interessante atribuir um valor a uma determinada característica associando ao estado de alteração uma análise quantitativa de um determinado parâmetro, como resistência, permeabilidade, porosidade, diminuindo a subjetividade inerente à caracterização qualitativa. Deve-se avaliar estes parâmetros inicialmente e com o decorrer do avanço da alteração.

Neste trabalho procura-se avaliar quantitativamente a variação das propriedades físicas e a queda de resistência com a evolução do processo de alteração obtidos através de ensaios de laboratório simulando a ação do intemperismo.

A Tabela 4 mostra a classificação das rochas quanto ao grau de alteração, de acordo com a ISRM (1981).

Tabela 4- Graus de alteração (ISRM, 1981)

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

À medida que a rocha se altera, passa da condição de rocha fresca para semi-alterada e daí para solo. Os valores de coesão e do ângulo de atrito diminuem gradualmente, até atingirem valores mínimos, na condição de solo, quando podem alcançar a condição de ruptura, como mostrado na Figura 6 (Fiori e Carmignari, 2001).

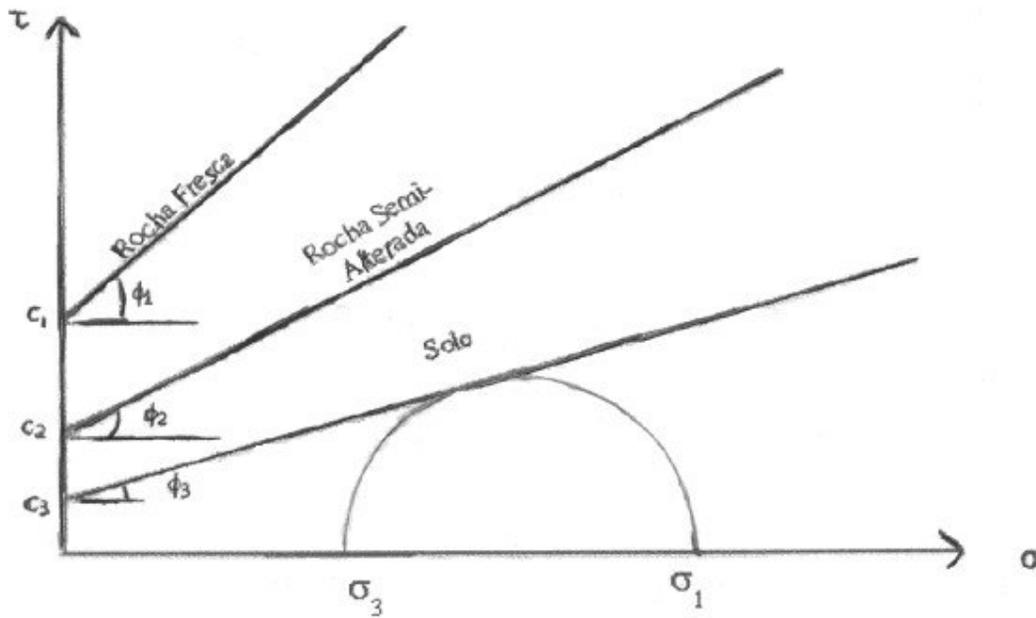


Figura 6 - Influência do grau de alteração na resistência mecânica das rochas. (Fiori e Carmignari, 2001).

Também o microfraturamento influencia fortemente no processo de alteração das rochas.

Os maciços fraturados e expostos à ação do intemperismo tornam-se mais susceptíveis a penetração de água, facilitando a degradação química. Neste caso a degradação do maciço rochoso inicia-se ao longo destas fraturas.

A percolação da água por entre as fraturas em taludes e tetos das escavações subterrâneas tende a acelerar o processo de instabilização do maciço. Tangchawal (1990) considera que o efeito provocado pela umidade nos taludes será a diminuição do fator de segurança, até que se atinja o equilíbrio limite e daí o colapso, como consequência da redução da resistência. Também Yokota e Iwamatsu (1999) comentam o efeito da percolação da água sobre o talude afetando sua estabilidade.

A variação da umidade apresentada pelas rochas brandas pode provocar expansão-contracção, queda de resistência e aumento na deformabilidade, como salientado por Marques e Vargas Jr. (1994).

Bell *et. al* (1997) estudaram o aumento de volume apresentado por xistos, devido a umidade, relacionando esse fenômeno ao desenvolvimento dos minerais formados pela ação do intemperismo.

Taylor e Smith (1986) consideram a presença de descontinuidades e a expansão de argilo-minerais associada à elevada umidade como controladores do processo de decomposição das rochas. Também Gökçeoglu *et al.* (2000) comentam a influência dos argilo-minerais no processo de degradação das rochas.

Outro fator que deve ser ressaltado no processo de alteração é a composição mineralógica.

A presença de certos minerais pode tornar os processos intempéricos mais acelerados. O mineral que apresenta maior estabilidade diante dos processos intempéricos é o quartzo; minerais com estabilidade intermediária, em ordem decrescente são muscovita, ortoclásio potássico, plagioclásio sódico, plagioclásio cálcico, biotita, anfibólio, piroxênio e olivina. A olivina é o menos estável, sofrendo decomposição com facilidade em montmorilonita (Hunt, 1984). Pode-se dizer que rochas ricas em olivina, piroxênio são mais susceptíveis à alteração, enquanto rochas com grande quantidade de quartzo possuem uma maior resistência à alteração.

Goodman (1993) afirma que a ordem de alterabilidade dos minerais é aproximadamente a reversa de sua cristalização. Ou seja, as olivinas formadas primeiramente com a fundição a altas temperaturas são mais facilmente removidas na atmosfera, em seguida aparece piroxênio, anfibólio, biotita, plagioclásio cálcico, plagioclásio sódico, ortoclásio potássico.

#### **2.2.4.1 Ensaio de Alterabilidade Acelerada**

A alterabilidade pode ser entendida como a velocidade da evolução no tempo do estado de alteração (CESP, 1990).

Fookes *et. al* (1988) enfatizam que os ensaios de simulação, tais como ciclagem água-estufa, procuram refletir os processos de degradação que os materiais sofreram quando expostos aos agentes externos. Também Marques *et. al* (2004) salientam que os ensaios de ciclagem água-estufa permitem a caracterização do comportamento das rochas quando submetidas a diferentes condições ambientais que podem conduzir à alteração.

Os ensaios de alterabilidade conduzem a uma degradação do material rochoso de forma mais rápida quando se compara com o mesmo fenômeno na natureza.

Estes ensaios permitem que uma mesma amostra seja submetida a vários ciclos de umedecimento e secagem, a partir dos quais se podem obter parâmetros e/ou propriedades

afetadas pelo processo de ciclagem, permitindo uma comparação quantitativa entre as amostras ensaiadas e removendo a subjetividade da análise.

A aceleração do processo de alteração das rochas, via ensaio de alterabilidade, deve-se ao aumento à exposição a determinados agentes a que rocha está submetida, a quantidade de fluidos no processo e em determinados casos a modificações na temperatura. Com o decorrer dos ciclos, pode-se acompanhar a evolução do processo de alteração.

Os ensaios de alterabilidade acelerada simulam mecanismos de alteração física e química presentes na natureza (Ladeira, 1983). Os principais mecanismos de alteração química são: hidrólise, hidratação, dissolução. Como mecanismos de natureza física têm-se: liberação de tensões por erosão, ou por variações de temperatura, embebição- secagem e expansão.

Lopes (2000) realizou ensaios de alterabilidade (ciclagem água-estufa) em amostras de xisto grafitoso e clorita xisto, com o intuito de verificar de que forma a pirita atua no processo de desagregação de algumas litologias, utilizando a metodologia desenvolvida pela CESP (1990). Nos ensaios o autor adotou ciclos alternados de umedecimento e secagem, sendo 24 horas de imersão em água destilada e períodos de 12 horas de secagem em estufa. A cada 10 ciclos efetuaram-se avaliações qualitativas. O autor verificou que a alteração da pirita contribuiu para o surgimento e propagação de fraturas, as quais podem instabilizar porções do maciço.

Pode-se avaliar o processo de alteração das rochas, por meio de ensaio de alterabilidade acelerada, não apenas por embebição e secagem, mas também submetendo o material rochoso a determinadas substâncias, como etileno-glicol ou simulando o efeito das condições atmosféricas como no extrator Soxhlet, conforme apresentado nas normas MCA-12 e MRL-03 das Centrais elétricas de São Paulo-CESP (1990), respectivamente.

Marques *et. al* (2004) adotaram a norma MRL-02 (CESP,1990) para a realização dos ensaios de ciclagem água-estufa, utilizando, para isto, amostras com os seguintes diâmetros:  $1,27 < d < 2,54$ cm;  $2,54 < d < 5,08$ cm e  $d > 5,08$ cm. O mesmo autor realizou também ensaio de ataque pelo etileno-glicol e lixiviação contínua via extrator Soxhlet. As amostras foram avaliadas qualitativamente, quanto à propagação de fraturas e desintegração.

Bell *et. al* (1997), por sua vez, em ensaios de ciclagem água-estufa com xistos adotaram diâmetros de 38mm e comprimento de 25mm para as suas amostras. As espécies foram avaliadas em termos de desenvolvimento de trincas ou qualquer outro tipo de ataque que ocorresse. Os autores também realizaram ensaios de aquecimento-resfriamento, tendo

as amostras as mesmas dimensões daquelas submetidas à ciclagem água-estufa. Os efeitos do processo de ciclagem foram pequenos a partir do sétimo ciclo.

Duperret *et. al* (2005) realizaram ensaios de alterabilidade (ciclagem água- estufa) em taludes costeiros de calcários, no noroeste da França. Para isto, foram utilizadas amostras com diâmetro variando de 25 a 35 mm e comprimento de 30 a 50 mm, sendo um grupo submetido à ciclagem com água destilada e outro com água do mar. Estas amostras experimentaram 10 ciclos, sendo 12 horas de umedecimento e 11 horas de secagem em estufa. Com estes ensaios procurou-se reproduzir as condições de campo, ou seja, os processos intempéricos devido à ação da água do mar em períodos de alta maré e a infiltração da água da chuva nos calcários.

Cánton *et. al* (2001) produziram três seqüências de ciclos alternados de umedecimento e secagem (5, 10 e 20 ciclos), procurando reproduzir em laboratório as condições de intemperismo verificada pelos xistos e calcários, por eles estudados. A deterioração das amostras, segundo os autores, representa o efeito combinado de umedecimento e secagem e também dissolução dos sais.

Sadisun *et. al* (2005) utilizando amostras cúbicas de 4cm, efetuaram ensaios em três situações: exposição ao ar, imersão e ciclagem água-estufa. As amostras foram avaliadas segundo abertura e desenvolvimento de fraturas e quantitativamente segundo um índice de alterabilidade definido como a percentagem de material perdido no ensaio pela massa seca inicial, e classificados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5- Índice de Aletrabilidade-Is (Sadisun *et. al*, 2005)

Classe	Valores	Índice deAlterabilidade (I <sub>s</sub> )
1	0-2%	Muito baixo
2	2-10%	Baixo
3	10-25%	Médio
4	25-50%	Alto
5	50-85%	Muito alto
6	85-100%	Extremamente alto

## 2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

A precisão e a confiabilidade dos métodos de análise de estabilidade são limitadas devido à dificuldade na previsão da persistência das descontinuidades, as quais têm grande influência na resistência ao cisalhamento, o efeito escala na extrapolação dos valores de resistência ao cisalhamento de laboratório para o campo, modificações na resistência, pressão de água com o desenvolvimento do movimento, etc.

Métodos de equilíbrio-limite e de análise tensão-deformação podem ser utilizados nas análises de estabilidade de taludes.

Nas análises por equilíbrio-limite é adequado que a forma e a localização da superfície de ruptura sejam conhecidas de antemão. A deformação do material não é considerada, e a condição de equilíbrio é determinada apenas por forças e/ou momentos. O somatório das forças e/ou momentos resistentes à ruptura é comparado com o somatório das forças e/ou momentos que induzem ao deslizamento. A razão entre estas forças ou momentos é chamada fator de segurança. Estes métodos tendem a dar valores irrealistas de fator de segurança, desde que toda resistência cisalhante é assumida estar mobilizada simultaneamente ao longo de toda superfície de ruptura.

Segundo Giani (1992), a análise de estabilidade pode ser efetuada por equações de equilíbrio estático e dinâmico. A primeira considera a possibilidade cinemática de cada bloco exposto na face do talude deslizar ou tombar. Esta análise envolve a força peso, forças devido à percolação da água pelas descontinuidades, forças resistentes e mobilizante.

Na análise por equações de equilíbrio dinâmico simula-se o comportamento de um sistema de blocos. A análise refere-se à computação da movimentação de blocos ou quando blocos estão submetidos a tensões cíclicas ou condições sísmicas.

Nos métodos de análise tensão-deformação as deformações são consideradas, sendo desejável sua aplicação nos problemas de ruptura envolvendo significativa deformação. Além disso, a superfície de ruptura não precisa ser conhecida previamente; a análise conduzirá a uma superfície de ruptura através da interpretação dos resultados de tensões e/ou deformações.

Franklin & Dusseault (1989) comentam que com as análises tensão-deformação pode-se resolver problemas com geometrias complexas, várias camadas de rocha e suportes, e complexas relações constitutivas.

De acordo com Sjöberg (1999), a análise tensão-deformação pode ser considerada mais adequada para a análise de mecanismos de ruptura quando comparado aos métodos de equilíbrio-limite já que é mais geral e flexível. Além disso, ajuda a identificar fatores que são os responsáveis desencadeadores de ruptura.

A simulação de rupturas pode ser conduzida por abordagem contínua ou descontínua.

A modelagem numérica permite representar descontinuidades mecânicas de forma implícita ou explícita computacionalmente.

Na abordagem contínua poucas fraturas encontram-se presentes ou o maciço é extremamente fraturado (contínuo equivalente). Para tal abordagem a liberação de blocos não deve ser fator determinante da ruptura. Para maciços moderadamente fraturados, tal que o número de fraturas impossibilite tratá-lo como contínuo, ou envolva grandes deslocamentos de blocos individuais, aplica-se a abordagem descontínua.

Nos modelos descontínuos, as descontinuidades são incluídas explicitamente no modelo e a ruptura pode ocorrer segundo uma ou várias descontinuidades e também pela rocha (Jing, 2003).

Como métodos numéricos contínuos têm-se: método das diferenças finitas, método dos elementos finitos e método dos elementos de contorno. E representando métodos descontínuos pode-se citar o método dos elementos discretos.

Uma outra classe a qual corresponde à combinação de métodos, eliminando as características indesejáveis de um enquanto se retêm as muitas vantagens do outro, trata-se dos métodos híbridos. O híbrido elementos de contorno/elementos finitos é eficiente computacionalmente, sendo hábil para tratar o comportamento não-linear de materiais na região dos elementos finitos, enquanto o comportamento de materiais distante da escavação pode ser tratado como linear na região dos elementos de contorno.

Segundo Jing & Hudson( 2002) especial atenção necessita ser dada às condições de compatibilidade e continuidade nas interfaces entre regiões de modelos diferentes, particularmente quando materiais diferentes estão envolvidos.

Muitos estudos a respeito de análise da estabilidade de taludes têm sido realizados na região do Quadrilátero Ferrífero, destacam-se: Ferreira (2004), Pinheiro (2002), Fernandes (2000), Lana (2000), Scarpelli (1994), Figueiredo e Aquino (2005).

Ferreira (2004), em estudos no Morro do Curral, em Ouro Preto-MG, realizou cálculos de estabilidade a fim de avaliar a extensão da ruptura ocorrida no xisto Sabará, aplicando-se o método de equilíbrio-limite para estudo da ruptura. Em outro local da encosta, Pinheiro (2002) identificou rupturas (planar e em cunha), e a partir da utilização de projeções estereográficas efetuou a análise cinemática dos mecanismos de ruptura condicionados por planos de fraturas e pela superfície de xistosidade. Também na mesma encosta, Fernandes (2000) analisou um talude urbano em xisto, sendo os mecanismos de ruptura possíveis descritos qualitativamente.

Lana (2000) estudou mecanismos de ruptura em um talude, escavado em quartzito, de grande altura na Mina de Timbopeba (CVRD), onde a análise cinemática foi realizada com o auxílio de projeção inclinada.

O trabalho de Scarpelli (1994) apresenta uma compilação das principais classificações geomecânicas adotadas em diversas minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero. A autora ainda destaca a importância das feições estruturais na estabilidade dos taludes nessa região.

Figueiredo e Aquino (2005) utilizando o método de elementos finitos analisaram o tombamento flexural de um talude da Mina do Pico, MBR (Minerações Brasileiras Reunidas), em Itabirito/MG, avaliando o comportamento mecânico do material.

Outros trabalhos nesta região também merecem destaque, como: Lana e Gripp (1999) e Figueiredo e Lana (1999). Ambos os trabalhos foram realizados em um talude em quartzito na Mina de Timbopeba (CVRD). No primeiro, estudaram-se os mecanismos de ruptura ao longo deste talude. Enquanto no segundo foi analisada a possibilidade de ruptura global do talude, a partir da utilização de análise tensão-deformação.

### **2.3.1 Método dos Elementos Finitos**

O método dos elementos finitos requer a divisão do domínio do problema em subdomínios, elementos de pequeno tamanho e formas padrão (triangular, quadrilateral) com número fixo de nós nos vértices e lados, ou seja, a discretização do domínio. Elementos vizinhos compartilham nós e arestas.

A Figura 7 mostra o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos. Na Figura (7a) tem-se um meio infinito, seu carregamento, e uma abertura no seu interior. A Figura (7b) traz uma malha típica do modelo, com extensão limitada, composta de elementos triangulares de três pontos nodais. As condições de contorno podem ser aplicadas como forças de superfície ou deslocamentos prescritos. Na Figura (7c) exibe-se um elemento individualizado, apresentando as componentes de força e deslocamento nodais.

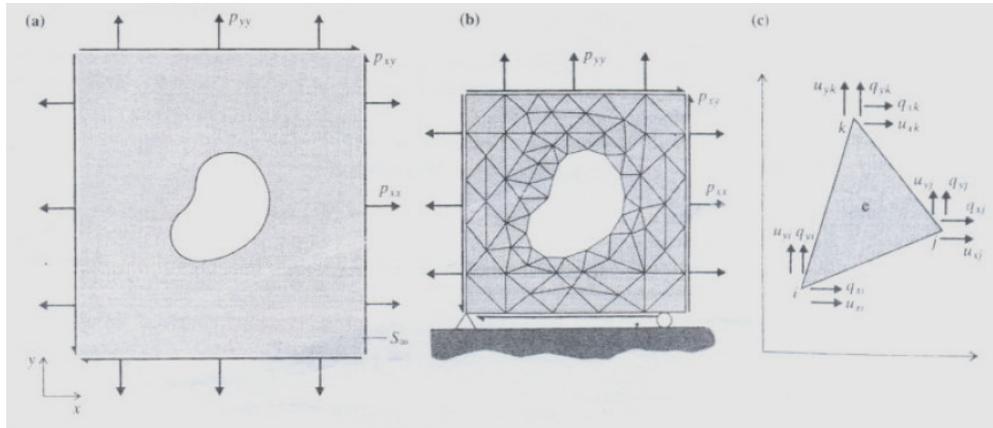


Figura 7- Modelo de Elementos Finitos (Brady e Brown, 1985)

Em determinadas regiões, tais como, próximo à face livre de um talude e pilares de minas é necessária uma maior densidade de elementos já que a variação das tensões é acentuada, ver Figura 7b.

As forças de massa ou superfície, agindo em um elemento qualquer, são substituídas por um sistema de forças estaticamente equivalentes atuando nos pontos nodais (Jaeger & Cook, 1979). Estas forças nodais equivalem às forças atuando entre elementos ao longo das arestas.

As componentes de deslocamento  $\{u\} = (u_x \ u_y)$  em qualquer ponto dentro do elemento são definidas a partir de um grupo de funções de interpolação em termos de deslocamentos nodais que compõem o vetor  $\{U\}_{6 \times 1} = (u_{xi}, u_{yi}, u_{xj}, u_{yj}, u_{xk}, u_{yk})$ . Logo  $\{u\} = [N]\{U\}$ , onde  $[N]_{2 \times 6}$  é uma matriz cujos elementos são as funções de interpolação, sendo lineares para o caso dos triângulos de três nós (Brady & Brown, 1985).

No caso plano as componentes de deformação apresentam (Jaeger & Cook, 1979):  $\epsilon_x = \partial u_x / \partial x$ ,  $\epsilon_y = \partial u_y / \partial y$ ,  $\gamma_{xy} = \partial u_x / \partial y + \partial u_y / \partial x$ . As deformações podem ser expressadas por um vetor  $\{\epsilon\}_{3 \times 1} = (\epsilon_x \ \epsilon_y \ \gamma_{xy})$ . As componentes de deformação podem ser calculadas do

deslocamento e esta relação pode ser expressa da seguinte forma:  $\{\varepsilon\}=[A]\{u\}$ . Onde  $[A]_{3 \times 2}$  representa uma matriz de operadores diferenciais. Sendo  $[B]_{3 \times 6}$  uma matriz de constantes que dependem exclusivamente das coordenadas nodais, tem-se:  $\{\varepsilon\}=[A][N]\{u\}=[B]\{U\}$  (Brady & Brown,1985).

Da mesma forma, as forças atuantes nos vértices dos triângulos  $q_{xi}$ ,  $q_{yi}$ ,  $q_{xj}$ ,  $q_{yj}$ ,  $q_{xi}$  e  $q_{yk}$  podem ser representadas pelo vetor  $\{q\}_{6 \times 1}$ , as quais podem ser relacionadas ao vetor de tensões 2D,  $\{\sigma\}_{3 \times 1}=(\sigma_x \ \sigma_y \ \tau_{xy})$ . A expressão que relaciona força com tensão é a seguinte:  $\{q\}=[B]^t\{\sigma\}V_e$ , onde  $V_e$  é o volume do elemento e  $[B]^t$  é a matriz transposta  $[B]$  (Brady & Brown,1985).

A relação tensão-deformação para o material e condição de deformação plana é dada pela expressão:  $\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\}$ , na qual  $[C]_{3 \times 3}$  é uma matriz tensão-deformação (Jaeger & Cook,1979). Combinando as equações anteriores, forças nodais  $\{q\}$  em função dos deslocamentos  $\{u\}$  tem-se:  $\{q\}=[B]^t[C][B]V_e\{U\}=[k]\{U\}$ , onde  $[k]=[B]^t[C][B]V_e$  é uma matriz  $6 \times 6$ , denominada matriz de rigidez do elemento triangular (Leite, 2004).

A partir da compatibilidade de forças e deslocamentos dos nós compartilhados por elementos vizinhos, tem-se um sistema de equações algébricas simultâneas, resultando na discretização do meio por elementos finitos:  $\{Q_g\}=[K_g]\{U\}$ , onde  $\{Q_g\}_{2n \times 1}$   $\{U\}_{2n \times 1}$  são vetores que representam toda a malha (cargas e deslocamentos nodais) e  $[K_g]$  é a matriz de rigidez global; sendo  $n$  o número total de nós (Reis,2005).

O problema estará resolvido quando as cargas, inicialmente desbalanceadas, entrarem em equilíbrio, ou seja, quando o deslocamento de cada nó resultar em esforços iguais, mas de sentidos opostos, nos elementos que o compartilhem (Leite, 2004).

A deformação induzida uma vez determinada, a partir dos deslocamentos nodais, possibilitará calcular o estado de tensão (Leite, 2004). O estado de tensão total dentro de um elemento é a soma das tensões induzidas e tensões iniciais (Brady & Brown, 1985).

Este método é talvez o método numérico mais largamente empregado em engenharia atualmente devido, como citado anteriormente, a sua flexibilidade no tratamento de materiais heterogêneos, não-linearidade, anisotropia, tensões *in situ* e condições de fronteira.

O método de elementos finitos permite modelar a história do estado de tensões, ou seja, simular construções e escavações; diferentes comportamentos de deformação; leis constitutivas são possíveis considerar, a elasto-plasticidade, ou deformação plástica dos materiais e descontinuidades principais.

Jing (2003) ainda ressalta que a sua aplicação mais comum refere-se a modelos bidimensionais, sendo os modelos em 3D mais trabalhosos.

Neste estudo optou-se pela utilização do método de elementos finitos utilizando o programa *Phase<sup>2</sup>6. 0* da Rocscience (Canadá), a fim de analisar a ruptura ocorrida na Cava Cachorro Bravo, na Mina Córrego do Sítio, em Santa Bárbara-MG.

## 2.4 MECANISMOS DE RUPTURA

Com a determinação do mecanismo de ruptura é possível avaliar a probabilidade desta ocorrer, o fator de segurança e realizar uma previsão do grau de risco aceitável (Goodman,1989).

A condição para que a ruptura planar ocorra é a seguinte:

- Direção aproximadamente paralela à face do talude;
- Mergulho menor que a face do talude permitindo o material acima da descontinuidade deslizar e ainda;

Na ruptura planar não há desenvolvimento de momentos que possam causar rotação do bloco, com a ruptura ocorrendo por deslizamento. A força peso do bloco instável, a força devido à pressão de água na superfície de deslizamento e a força devida à pressão de água na fenda de tração agem através do centro de massa instável (Hoek & Bray,1981).

A ruptura por cunha desenvolve-se a partir de duas descontinuidades distintas, com a inclinação da linha de interseção menor que a inclinação da face do talude, assim como, o ângulo de atrito menor que o ângulo de inclinação da linha de interseção.

As condições sob as quais a ruptura circular irá ocorrer surgem quando fragmentos individuais em um maciço rochoso ou partículas em um solo são muito pequenas, se comparadas com o tamanho do talude e quando estes fragmentos ou partículas não estão ligadas umas às outras, como resultado de sua forma (Hoek & Bray,1981).

Em solos superficiais ou rochas fortemente alteradas ou fraturadas verifica-se a ruptura ao longo de uma superfície de forma aproximadamente circular. Também fragmentos rochosos em uma grande pilha de estéril tenderão a se comportar como um solo e este tipo de ruptura poderá ocorrer.

A ruptura por tombamento é resultado de movimentos que incluem a rotação de colunas ou blocos de rocha sobre uma base fixa. Descontinuidades paralelas à crista do talude, mergulhando para o interior do maciço são características deste tipo de ruptura.

Mecanismos de tombamento também podem envolver rochas brandas com fendas de tração verticais ou de forte inclinação. Caso as rupturas não sejam controladas grande volume de material pode ser envolvido.

Determinados fatores são desencadeadores desta ruptura (Sjörberg,1999):

- Resistência e orientação das juntas;
- Resistência da rocha intacta, e;
- Deformabilidade do maciço rochoso.

Em campo podem ser encontradas diferentes formas de tombamento, as quais são apresentadas a seguir:

- 1) Tombamento Flexural (Figura 8) está relacionado a colunas contínuas de rocha, separadas por descontinuidades, com forte mergulho, quebram-se por flexão, ao dobrarem-se para frente. O início do tombamento pode ocorrer através de deslizamento ou erosão do pé do talude criando fendas de tração largas e profundas. Comumente verificado em filitos, xistos e ardósias.

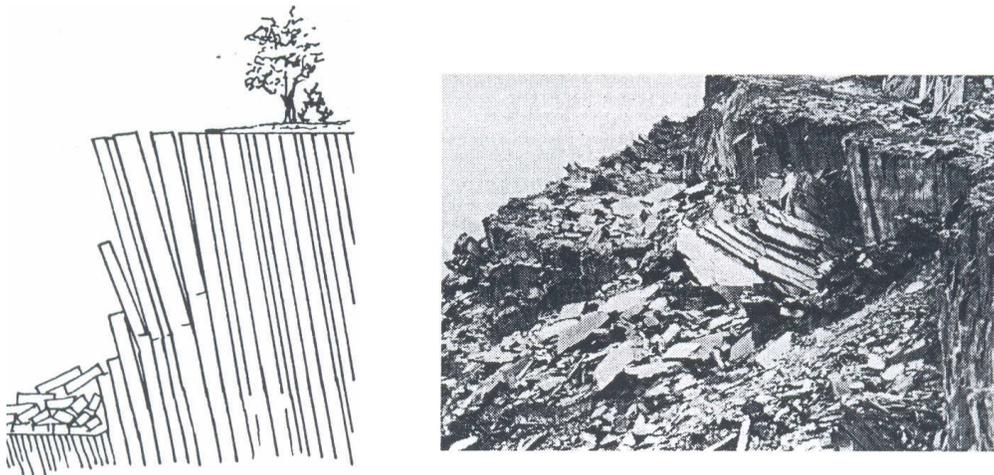


Figura 8- Tombamento Flexural (Hoek & Bray,1981)

- 2) Tombamento de Blocos (Figura 9) verifica-se em colunas individuais por descontinuidades espaçadas. Os blocos localizados no pé do talude recebem o esforço (transferência de carga) dos blocos acima, empurrando-os para frente.

Degraus formados na base do maciço são característicos desta classe de tombamento, ocorrendo em arenitos e calcários.

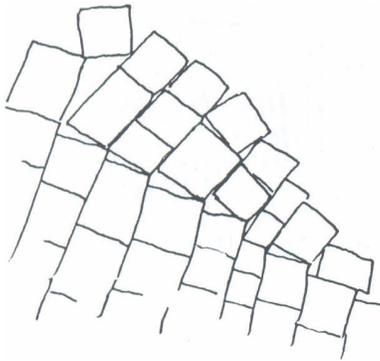


Figura 9 – Tombamento de Blocos (Hoek & Bray, 1981)

3) Tombamento de blocos por flexão (Figura 10) ocorre por flexão pseudocontínua através de extensas colunas compostas por várias descontinuidades ortogonais. O tombamento resulta de deslocamentos acumulados através de descontinuidades ortogonais. Esta classe de tombamento pode ser verificada em camadas de arenito, xisto e finas camadas de calcário.

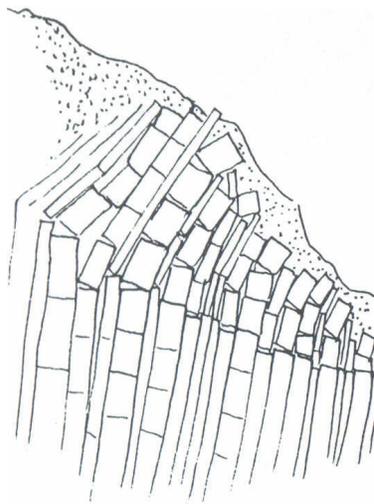


Figura 10- Tombamento de Blocos por Flexão (Hoek e Bray, 1981)

4) Tombamento Secundário resulta de movimentos em que a ruptura por tombamento ocorre apenas em partes do talude. A Figura (11a) mostra a instabilização da parte superior do talude de rocha dura com forte mergulho, conduzindo ao tombamento do pé do talude. A Figura (11b) exhibe o tombamento na base do talude como consequência do arraste de camadas de forte mergulho pela instabilização do material superior. Na Figura (11c) camadas inferiores causam o tombamento das camadas superiores. A Figura (11d) mostra o tombamento da rocha colunar em virtude da alteração do material subjacente. Na Figura (11e) o tombamento deve-se á presença de fendas de tração em um material coesivo.

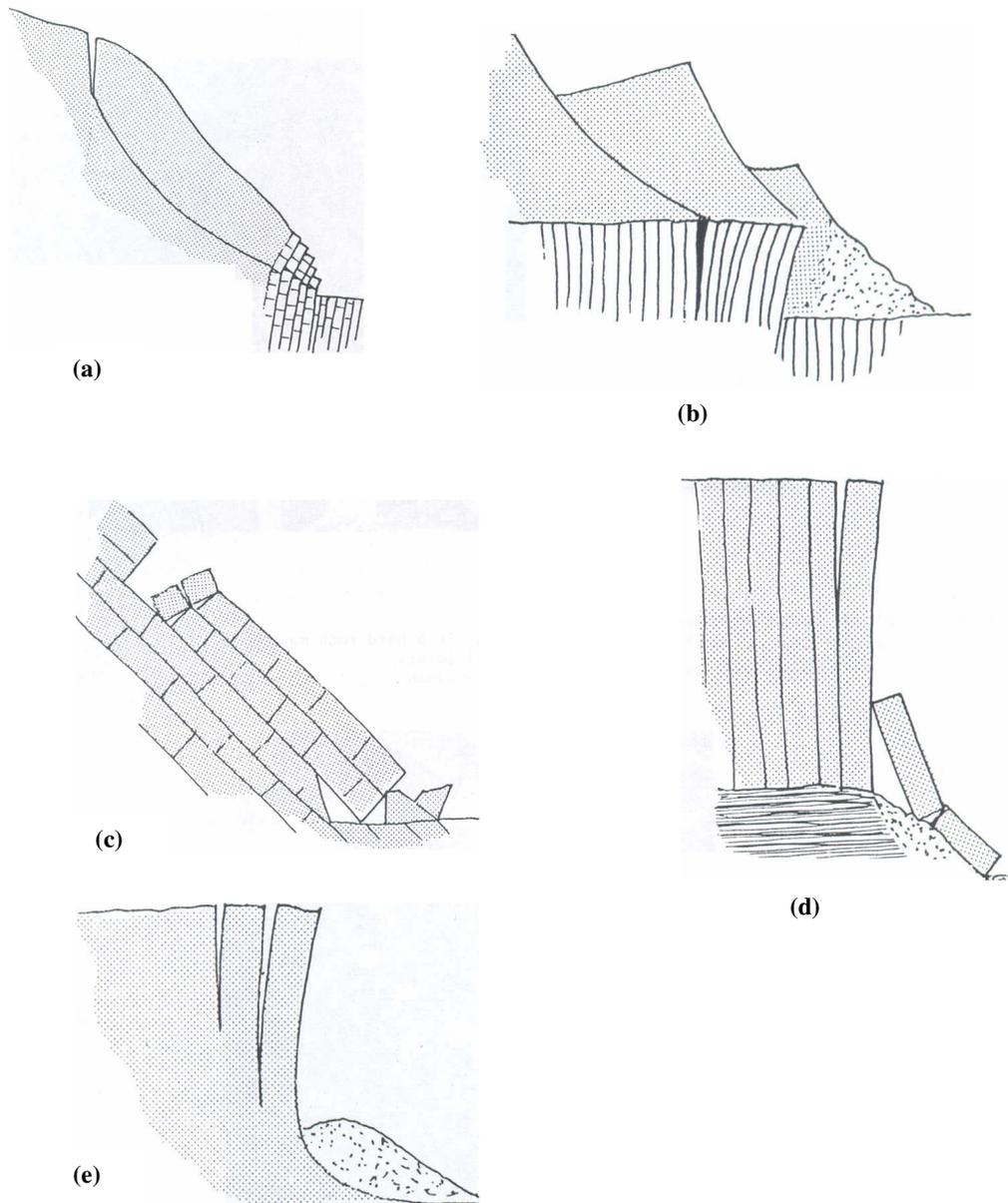


Figura 11- Tipos de Tombamento Secundário (Hoek & Bray, 1981)

Adhikary *et.al* (2001) comentam que em taludes de rochas foliadas dois mecanismos de ruptura devem ser considerados: se a descontinuidade mergulha para dentro do maciço rochoso as camadas rochosas podem inclinar-se para dentro da escavação conduzindo ao tombamento flexural, no entanto, com a descontinuidade mergulhando no sentido da face

do talude as camadas rochosas podem flambar sob seu peso próprio ocasionando a ruptura por flambagem (Figura12). Forças externas, tais como, pressão de água ou a concentração de tensões no plano da coluna podem conduzir a ruptura por flambagem.

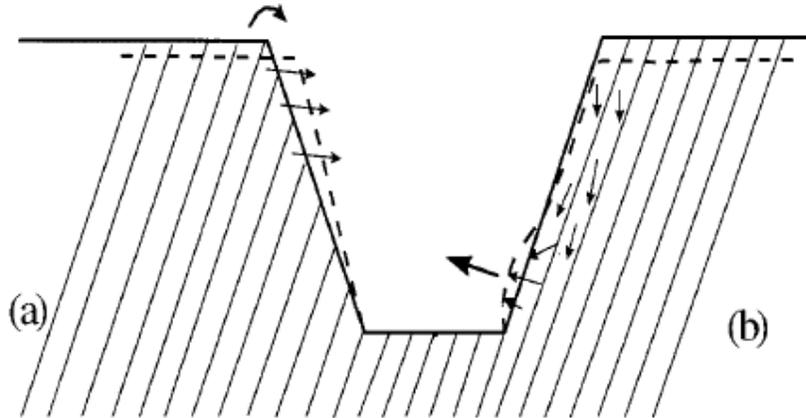


Figura 12- Talude em um maciço rochoso foliado: (a) tombamento flexural e (b) ruptura por flambagem (Adhikary *et.al*, 2001)

Sjöberg (1999) ressalta que a ruptura por flambagem pode se desenvolver caso tensões axiais na placa rochosa sejam altas e a coluna muito fina em relação ao seu comprimento.

Uma formulação analítica para a análise por flambagem pode ser feita através da equação de Euler, a qual permite determinar a tensão axial ( $\sigma_b$ ) necessária para a flambagem de uma placa:

$$\sigma_b = \frac{P_{cr}}{A_c} = \frac{\pi^2 EI}{A_c l^2} = \frac{\pi^2 E}{12(l/t)^2} \quad (1)$$

Onde:  $P_{cr}$ -carregamento crítico (força peso);

E -módulo de elasticidade da rocha entre placas;

l- comprimento da coluna rochosa;

t- espessura da coluna;

$A_c$ -área submetida ao carregamento ( $A_c=wt$ );

w- largura da coluna;

l/t- razão de esbeltez;

I-momento de inércia ( $I=wt^3/12$ ).

A teoria clássica de flambagem (método de Euler) é discutida em Goodman (1989), Cavers (1981) *apud* Giani (1992), Jaeger e Cook (1979) entre outros.

Segundo Goodman (1989), Figura 13 a ruptura por flambagem ocorreria quando a tensão paralela ao eixo da coluna ( $\sigma_L$ ) alcança a tensão crítica de Euler para flambagem ( $\sigma_b$ ), ou seja, para a ruptura ocorrer:  $\sigma_L = \sigma_b$ .

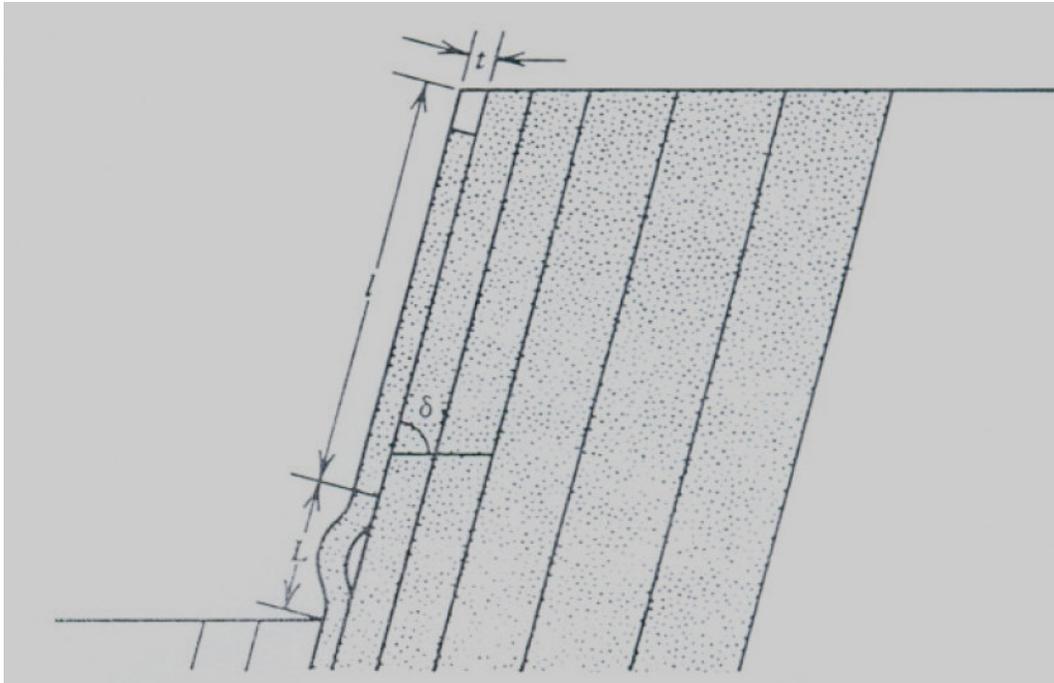


Figura 13- Análise de ruptura por flambagem (Goodman,1989)

$$\sigma_L = \frac{l \gamma \text{sen}(\delta - \phi_j)}{\text{sen}(90 + \phi_j)} \quad (2)$$

$$\sigma_b = \frac{\pi^2 E t^2}{3L^2} \quad (3)$$

Combinando (2) com (3) tem-se a altura crítica do talude (Goodman,1989):

$$l_{\max} = \frac{\pi^2 E t^2}{3L^2} \frac{\text{sen}(90 + \phi_j)}{\text{sen}(\delta - \phi_j)} \quad (4)$$

Onde:  $\gamma$ - peso específico;

l- altura do talude;

$\delta$ -ângulo do talude (inclinação da camada);

$\phi_j$ - ângulo de atrito da descontinuidade;

E-módulo de elasticidade da rocha entre camadas;

t- espessura da camada;

L-comprimento da camada que sofre flambagem.

Cavers (1981) *apud* Adhikary et.al (2001) utilizando a concepção de Euler para flambagem derivou uma expressão para a altura crítica do talude para ocorrência de flambagem. O autor propôs uma expressão para determinação de parâmetros de carregamento crítico, considerando apenas uma certa porção da camada rochosa, próxima ao pé do talude, sujeita a flambar. O restante da camada rochosa forneceria carregamento (carga) axial para a porção sujeita a ruptura por flambagem.

Segundo a teoria de Euler, nenhum momento lateral ocorre na coluna sob carregamento axial até a coluna flambar (Jaeger e Cook,1979).

Também merecem destaque os trabalhos sobre ruptura por flambagem, segundo abordagem analítica, realizados por Adhikary et.al (2001), Kazakidis (2002) e Seijmonsbergen et.al (2005).

Adhikary et. al (2001) em um primeiro momento, utilizaram a teoria de Cosserat para computar os fatores de carregamento crítico para taludes escavados em maciços rochosos, sendo estes fatores comparados com aqueles obtidos por Cavers (1981) *apud* Adhikary et. al (2001) . Com base nos cálculos numéricos estes autores criaram um ábaco para quatro diferentes ângulos de atrito da descontinuidade: 0,10,20 e 30<sup>0</sup> (Figura 14). Porém este gráfico não considera a existência de pressão de água.

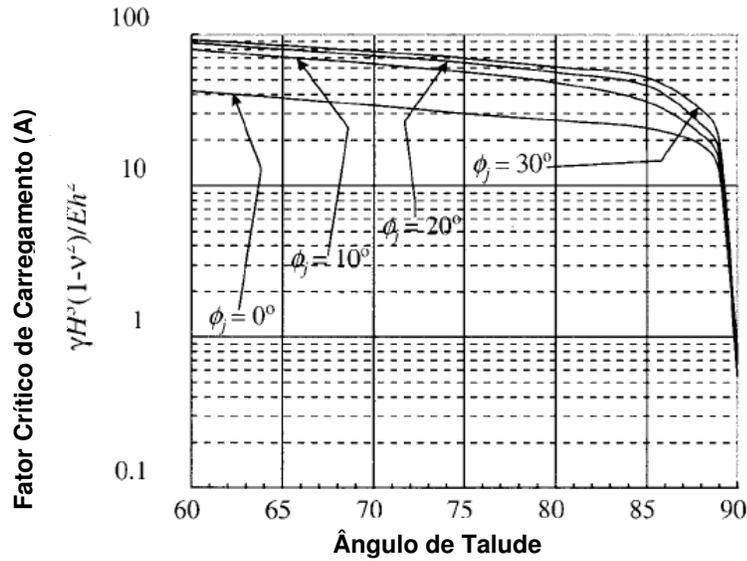


Figura 14- Ábaco para taludes rochosos foliados para o caso de descontinuidades com ângulos de atrito de 0,10,20,30° (Adhikary *et.al*, 2001)

Adhikary *et.al* (2001) a partir do ábaco citado (Figura 14) apresentam expressões para a altura crítica do talude para a ocorrência de ruptura por flambagem ( $H_b$ ) e a espessura limite da camada, ou seja, a espessura abaixo da qual produzirá ruptura por flambagem para um talude que já alcançou a altura crítica. Estas expressões são apresentadas abaixo:

$$H_b = \left( \frac{AEh^2}{\gamma} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Onde: E-módulo de elasticidade da rocha;

$\gamma$ - peso específico da rocha;

h- espessura da camada;

A- fator de carregamento crítico.

$$h^2 < \frac{1}{A} \left( \frac{\sigma_c}{\gamma} \right)^2 \left( \frac{\sigma_c}{E} \right) \quad (6)$$

Onde:  $\sigma_c$ -resistência compressiva uniaxial do maciço rochoso.

Estes autores visando verificar se rupturas cisalhantes precederam a ruptura por flambagem apresentam a seguinte expressão:

$$H_s = \frac{\sigma_c}{\gamma} \quad (7)$$

Onde:  $H_s$ - altura crítica para ruptura cisalhante.

Esta altura deve ser maior que  $H_b$  para a ruptura por flambagem ocorrer.

Em aberturas subterrâneas placas podem ser formadas devido à presença de altos níveis de tensão compressiva agindo paralelamente às fronteiras da escavação, gerando a ruptura por flambagem.

Kazakidiz (2002) objetivando quantificar o efeito do confinamento em uma coluna submetida à flambagem utilizou o critério de ruptura baseado na magnitude das tensões compressiva e de tração nesta coluna. O mesmo autor verificou que a pressão confinante fornecida pelo enchimento, assim como, pelo material armazenado no “ore pass” pode contribuir no controle da ruptura por flambagem sob certas condições de carregamento.

Seijmonsbergen et.al (2005) através de uma formulação analítica estudaram a ruptura por flambagem em taludes de margem variando o nível de água. Segundo estes autores a geologia da área, altas pressões de água após o período de glaciação e fendas de tração poderiam ser responsáveis pela ruptura por flambagem.

Stead e Eberhardt (1997) por outro lado, realizaram análises através do uso de técnicas de elementos distintos e diferenças finitas, a partir dos programas UDEC e FLAC, respectivamente, em taludes de carvão. O primeiro enfocou o deslizamento e rotação de blocos no pé do talude, enquanto o último modelou a deformação devido à flambagem de uma placa.

## **2.5 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA DE DESCONTINUIDADES**

Em geral, os critérios de resistência expressam a relação entre as componentes de tensão, de forma que a resistência ao cisalhamento de pico desenvolvida sob vários níveis de tensão possa ser prevista (Giani, 1992).

Na Cava Crista destaca-se a presença de rugosidades no plano de xistosidade, o que não se verificou nas outras áreas estudadas. Dentre os critérios de resistência a serem

apresentados citam-se: Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb, Critério de Patton e Critério de Barton-Bandis.

### 2.5.1 Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

Para descontinuidades planares, onde nenhuma superfície irregular ou ondulação é presente, adota-se o critério de Mohr-Coulomb.

O critério de Mohr-Coulomb pode fornecer uma boa representação das condições de resistência ao cisalhamento de descontinuidade em rocha (Bardy & Brtown, 1985).

A resistência ao cisalhamento de solos e rochas é resultado de duas parcelas, uma devido à coesão e outra relacionada ao atrito do material. Com relação à última parcela, esta é dependente da tensão normal atuante no plano em que a resistência ao cisalhamento é mobilizada.

Este critério é expresso em termos de tensões como:

$$\tau=c+\sigma\text{tg}\phi \quad (8)$$

Onde:  $\tau$ -tensão cisalhante;

$c$ -coesão;

$\sigma$ -tensão normal;

$\phi$ - ângulo de atrito.

A equação acima tem a seguinte interpretação física: a ruptura, por cisalhamento do material, ocorre quando a tensão cisalhante aplicada, subtraída do ângulo de atrito multiplicado pela tensão normal no plano de ruptura, torna-se igual à constante do material,  $c$  (Azevedo e Marques, 2002).

O critério de Mohr-Coulomb pode também ser utilizado na representação da resistência residual, a qual corresponde a resistência mínima experimentada pelo material após o pico devido à deformação. A coesão pode aproximar-se de zero, enquanto o ângulo de atrito residual  $\phi_r$  poderá variar entre zero e o ângulo de atrito de pico (Fiori e Carmignani, 2001).

### 2.5.2 Critério de Ruptura de Patton

Patton (1966) *apud* Hoek et al (1995) demonstrou a influência de ondulações na superfície de descontinuidade por meio de um experimento no qual ensaios de

cisalhamento foram realizados em amostras com rugosidade, conforme a Figura 15. À medida que a amostra se desloca ocorre a dilatação da amostra.

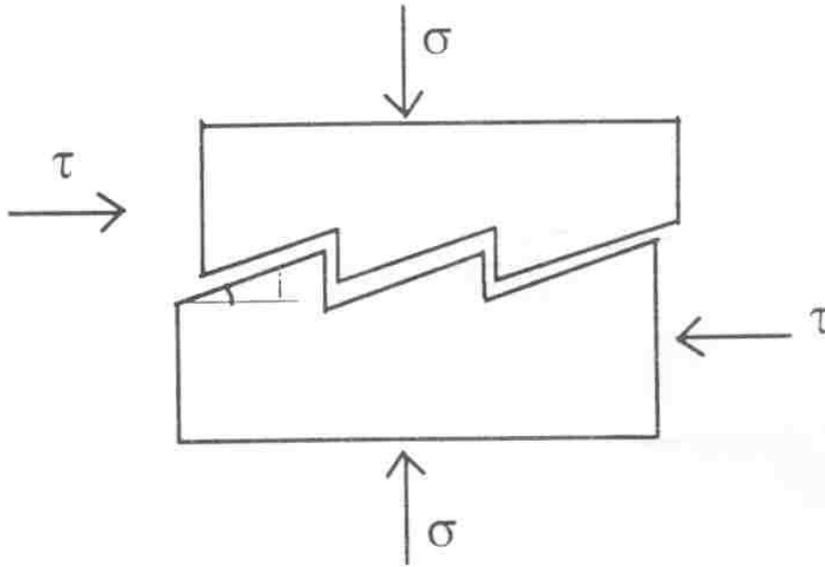


Figura15- Lei de Patton para a resistência ao cisalhamento da descontinuidade (Azevedo e Marques,2002)

A condição para o cisalhamento através das asperezas seria (Goodman,1989):

$$\tau = \sigma \tan(\phi_b + i) \quad (9)$$

e

$$\tau = c + \sigma \tan(\phi_r) \quad (10)$$

Onde:  $\phi_b$  - ângulo de atrito básico da superfície e;

$i$  - ângulo de dilatância;

$\phi_r$  - ângulo de atrito residual;

$c$  - coesão.

A equação9 é válida em baixos níveis de tensão normal, em que o deslocamento cisalhante é devido ao deslizamento ao longo da superfície inclinada. Em altos níveis de tensão (equação10) a resistência do material intacto será excedida e as asperezas tenderão a quebrar. A ruptura ao longo das asperezas gera um intercepto de resistência ao cisalhamento  $c$  e um novo ângulo de atrito ( $\phi_r$ ), relacionado ao deslizamento através da superfície da rocha, e, portanto, ângulo de atrito residual aproximado (Goodman,1989).

Este critério aplica-se a superfícies de descontinuidades com rugosidades, sendo estas responsáveis pelo aumento da resistência ao cisalhamento.

De acordo com Brady & Brown (1985) dois mecanismos são verificados neste modelo: o deslizamento segundo superfícies inclinadas em baixos níveis de tensão associado à dilatância do material, e cisalhamento das rugosidades (asperezas) em altos níveis de tensão. Os autores ainda ressaltam que a envoltória de resistência tende a ser curvilínea e não o modelo bi-linear idealizado mostrado na Figura 16.

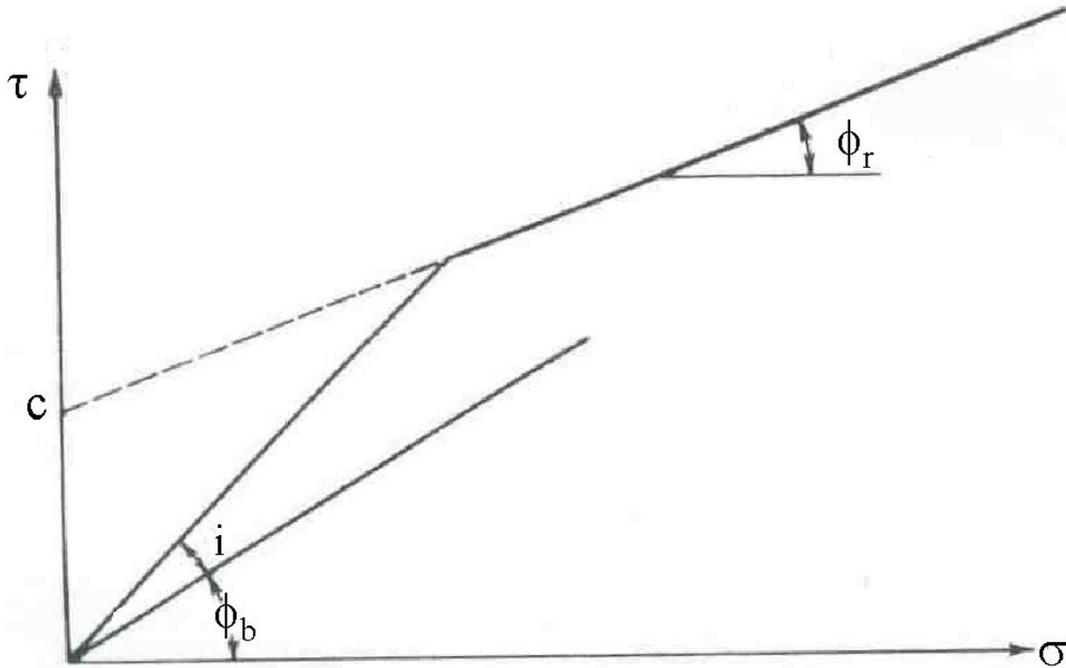


Figura 16 - Critério de Resistência bi-linear (Goodman,1989)

Com o aumento de tensão normal a dilatância tende a diminuir já que o número de rugosidades (irregularidades) cisalhadas aumentará (Brady & Brown, 1985).

### 2.5.3 Critério de Barton-Bandis

Uma abordagem alternativa para o problema da determinação da resistência ao cisalhamento de juntas rugosas foi proposta por Barton (1973) *apud* Hoek & Bray (1981).

Estes trabalhos foram aperfeiçoados chegando a uma equação empírica para a resistência ao cisalhamento de pico das juntas:

$$\tau = \sigma g \left( JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma} \right) + \phi_b \right) \quad (11)$$

Onde: JRC-coeficiente de rugosidade da junta (número determinado pela comparação da aparência de uma superfície de descontinuidade com perfis publicados por Barton & Choubey,1977 *apud* Hoek et.al, 1995, variando de 0 para juntas lisas, até 20 para juntas com alta rugosidade ou indiretamente por meio de *tilt test*);

JCS-resistência à compressão da junta (valor estimado a partir de ensaios com martelo de Schmidt);

$\phi_b$ -ângulo de atrito básico;

$\sigma$ -tensão normal.

A razão (JCS/ $\sigma$ ) e JRC combinam para formar a componente de rugosidade  $i$ . A resistência friccional total é então dada por:  $\phi_b+i$  (Brady & Brown, 1985).

Segundo Giani (1992) a resistência ao cisalhamento das descontinuidades seria formada por três componentes:

- Componente relacionada ao atrito ( $\phi_b$ );
- Componente geométrica controlada pela rugosidade (JRC);
- Componente de ruptura das asperezas controlada pela razão (JCS/ $\sigma$ ).

Em geral, uma junta rugosa alterada (JRC alto e JCS baixo) sofre maior dano durante o cisalhamento do que uma junta resistente e mais lisa (JCS alto e JRC baixo). Entretanto, ambas sofrerão baixa dilatância. Somente juntas com altos valores de JCS e JRC dilatam-se significativamente (Barton & Choubey,1977 *apud* Azevedo e Marques,2002).

### METODOLOGIA

#### 3.1 ESTRUTURAÇÃO

Este capítulo compreende as seguintes etapas: revisão bibliográfica; trabalhos de campo (amostragem); ensaios de laboratório (caracterização mineralógica, propriedades físicas e mecânicas, ensaios de alterabilidade) e análises de estabilidade para a Cava Cachorro Bravo.

#### 3.2 AMOSTRAGEM

Inicialmente foram escolhidas as áreas a serem estudadas, Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina. Estas áreas apresentam graus de alteração distintos, W3 (rocha moderadamente alterada) para as Cavas Crista e Cristina e W4 (rocha muito alterada) para a Cava Cachorro Bravo. Nestas áreas procedeu-se à identificação táctil visual dos melhores pontos de amostragem, ou seja, regiões menos fraturadas, para execução dos ensaios de laboratório.

Após a definição dos locais de amostragem, as amostras foram coletadas, acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto para preparação dos corpos de prova. Estas amostras foram utilizadas para a determinação dos índices físicos, ensaios de cisalhamento direto e ensaios de alterabilidade.

### 3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

#### 3.3.1 Caracterização Mineralógica

Nesta etapa do trabalho determinou-se a caracterização mineralógica das amostras por difratometria de raios-X e análise petrográfica por lâminas delgadas.

A análise por difração de raios-X distingue-se das análises petrográficas, pois a anterior permite apenas uma análise qualitativa da mineralogia presente, enquanto esta última proporciona uma análise quantitativa dos minerais.

As amostras a serem analisadas por difração de raios-X (amostras de pó total) foram pulverizadas, homogeneizadas e, então, levadas ao difratômetro RIGAKU, modelo GEIGERFLEX D/MAX-B, com goniômetro horizontal, tubo de Cobre, velocidade 1.2<sup>o</sup> por segundo e varredura de 2 a 70<sup>o</sup>.

Através da difração de raios-X é possível à identificação de possíveis minerais expansivos e aqueles capazes de se alterarem com maior facilidade.

Para as análises petrográficas foram confeccionadas lâminas em seções delgadas, visando à obtenção da composição mineralógica, textura, identificação dos minerais alterados e alteráveis.

As análises mineralógicas foram realizadas no laboratório de RX e de microscopia óptica do DEGEO/UFOP.

#### 3.3.2 Comportamento Geotécnico

As propriedades das rochas medidas em laboratório auxiliam na sua caracterização e classificação.

Foram determinados os seguintes índices físicos:

- Densidade relativa dos grãos  $G_s$  (ABNT NBR 6508, 1984).
- Peso específico natural ( $\gamma$ , kN/m<sup>3</sup>):  $\gamma = P/V$ ;
- Peso específico seco ( $\gamma_d$ , kN/m<sup>3</sup>):  $\gamma_d = P_s/V$ ;
- Porosidade (n, %):  $n = [1 - (\gamma_d / G_s)]$
- Índice de vazios (e):  $e = n / (1 - n)$ .

Onde: P= Peso Total

V= Volume total

P<sub>s</sub>= Peso de sólidos

Estes índices físicos foram determinados antes e após o ensaio de alterabilidade.

### 3.3.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto constou de uma fase inicial de adensamento do corpo de prova por 24 horas, submetendo-o apenas à tensão normal ( $\sigma$ ), e estabilizadas as deformações verticais, aplicou-se tensão cisalhante ( $\tau$ ) sob condições drenadas. Foram aplicadas cargas normais (N) e, em seguida, esforços tangenciais (T) crescentes, provocando o deslocamento de uma das partes da caixa em relação à outra, até que ocorresse a ruptura, a uma velocidade determinada.

Devido ao grau de alteração apresentado pelas amostras, os procedimentos adotados para ensaios de cisalhamento direto em corpos rochosos não puderam ser aplicados pela dificuldade de preparação dos corpos de prova nas condições exigidas.

O número de amostras perdidas quando da sua moldagem foi elevado, havendo quebras segundo a descontinuidade, deslocamento e trincas, impossibilitando a sua utilização em ensaios.

Os ensaios foram realizados em prensa de cisalhamento direto convencional utilizada para solos, do Laboratório de Geotecnia da Escola de Minas-UFOP (Figura 17).

Fernandes (2000) também realizou os ensaios de cisalhamento direto em amostras de xistos do Morro do Curral, Ouro Preto-MG em prensa convencional utilizada para solos. O autor ainda destaca a fragilidade das amostras, as quais deslocavam em bandas segundo a foliação.

Os corpos de prova foram moldados com auxílio de uma serra diamantada, com dimensões aproximadas de 10x10x2cm. Estes corpos de prova foram confeccionados no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia-DEGEO e na oficina de Cantaria-DEMIN.



Figura 17- Prensa de Cisalhamento direto utilizada na execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados com as seguintes tensões normais: 50, 100, 200, 400kPa para as Cavas Cachorro Bravo e Cristina; e com tensões de 25, 50, 100, 200, 300 e 400kPa para a Cava Crista. A diferença quanto ao nível de tensões adotado, deve-se ao fato de que para a última área efetuou-se um ajuste não linear (curvilíneo), no qual se necessitaram mais pontos para que fosse feito o ajuste; para as duas primeiras áreas adotou-se um ajuste linear, critério de Mohr-Coulomb. Estes ensaios foram realizados em condições próximas a umidade natural, sendo cisalhados 3 (três) corpos de prova para cada nível de tensão, excetuando a Cava Cristina onde o número de corpos de prova cisalhados foi menor, em virtude da quebra de parte das amostras quando da sua moldagem. Os ensaios foram feitos na direção paralela à xistosidade.

A respeito da velocidade, realizou-se um ensaio de adensamento unidimensional com o objetivo de determinar a velocidade de cisalhamento adequada para a o ensaio.

Do gráfico variação da altura x raiz de  $t$  (tempo), Figura 18, foi obtido o valor de  $t_{100}$ , o qual corresponde à 100% de consolidação devido à aplicação de carregamento. Ao final da fase de adensamento a amostra foi cisalhada determinando-se o  $\epsilon_f$  (deformação verificada na resistência de pico).

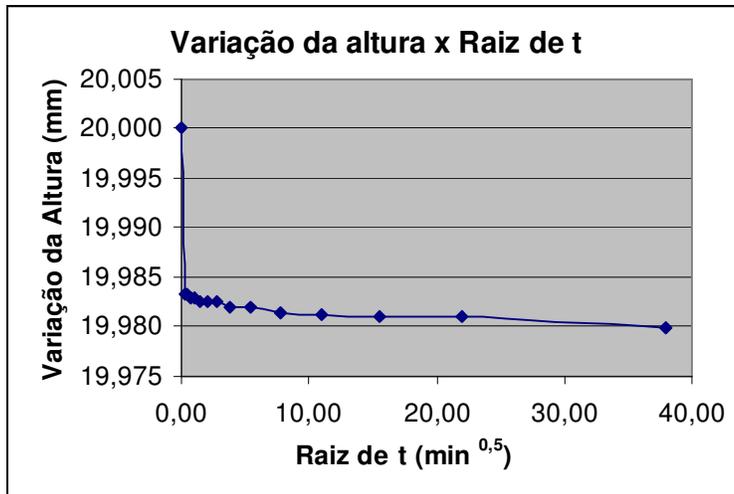


Figura 18-Relação entre a variação da altura (mm) *versus* raiz de t (min<sup>0,5</sup>).

Terminada esta etapa, estimou-se a velocidade do ensaio de cisalhamento direto, através da seguinte equação (Head, 1986):

$$v = \frac{H_0 \varepsilon_f}{100 t_f} \quad (12)$$

Onde:

v- velocidade do ensaio de cisalhamento (mm/min);

$\varepsilon_f$ - deformação verificada na resistência de pico;

$t_f$ - tempo requerido para atingir a resistência de pico (min);

$H_0$ - altura inicial do corpo de prova (mm).

Segundo Head (1986) o tempo requerido de ruptura é obtido pela seguinte expressão:

$$t_f = 12,7 \times t_{100} \quad (13)$$

A partir da determinação da velocidade executaram-se os ensaios de resistência com a velocidade de 0,12mm/min para todas as cavas, sendo essa velocidade a mais próxima dos valores calculados: 0,13mm/min para as Cavas Crista e Cristina e 0,15mm/min para a Cava Cachorro Bravo.

### 3.3.4 Ensaio de Alterabilidade Acelerada (ciclagem água-estufa)

Para a realização destes ensaios utilizou-se como referência as normas CESP (1990) e NBR 12696 ABNT (1992). Estas normas referem-se à avaliação de agregados, mediante ciclagem água-estufa.

Em um primeiro momento realizou-se um ensaio teste, com três amostras das áreas a serem estudadas de dimensões 10x10x2cm, com o intuito de prever o tempo e o número de ciclos a que as amostras seriam submetidas.

As amostras foram submetidas a 30 ciclos para as Cavas Crista e Cristina, e 20 ciclos para as amostras da Cava Cachorro Bravo, sendo sob estas efetuadas 13 horas de imersão em água e 10 horas de secagem em estufa, com uma hora de resfriamento. Estes ciclos encontram-se próximos aos valores sugeridos pela norma NBR 12696 ABNT (1992), a qual estabelece: período de imersão em água durante  $14 \pm 1h$ ; secagem em estufa durante  $8 \pm 1h$  e resfriamento durante  $60 \pm 5$  min.

O número de ciclos proposto foi inferior ao recomendado pelas normas CESP (1990) e NBR 12696 ABNT (1992), as quais determinam 120 ciclos. A adoção deste número justificou-se devido ao estado de degradação apresentado pelo material ensaiado, com as amostras não suportando 120 ciclos.

O ensaio consistiu em:

- Secar a amostra em estufa até atingir constância de massa;
- Resfriar a amostra durante cerca de 60 minutos;
- Pesar a amostra registrando a massa inicial ( $m_0$ ) em g;
- Imergir a amostra em água durante 13 horas;
- Secar a amostra em estufa durante 10 horas;
- Resfriar a amostra durante cerca de 60 minutos.

Nestes ensaios foram feitas avaliações qualitativas e quantitativas. A avaliação qualitativa é feita para verificar se a amostra apresenta sinais de desintegração, fragmentação, rachadura, lasqueamento.

A CESP (1990) define os vocábulos acima da seguinte forma:

- Desintegração: separação em partículas extremamente pequenas, de um ou mais fragmentos originais. É a cominuição do material.

- Fragmentação: separação em partes macroscopicamente identificáveis com facilidade, de um ou mais fragmentos originais.
- Rachadura: efeito que se manifesta através do aparecimento de fendas, sem que ocorra, contudo, a divisão do fragmento de rocha original em outros menores.
- Lasqueamento: separação em partes macroscopicamente identificáveis com facilidade, nas quais uma dimensão predomina sobre as outras duas.

Em termos quantitativos foi determinada a perda de massa em relação à massa inicial da amostra de ensaio.

$$\text{Perda de Massa} = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

$m_0$ - massa inicial da amostra (g);

$m$ -massa ao final do ensaio (g).

Com relação à análise quantitativa, promoveram-se adaptações na norma NBR 12696 ABNT (1992). De acordo com a norma, efetua-se o exame quantitativo considerando a massa inicial da amostra ( $m_0$ ) e a massa das partículas da amostra retidas na peneira de 19 mm, ao final de cada ciclo ( $m$ ).

Contudo, neste trabalho considerou-se, na análise quantitativa, a massa inicial seca ( $m_0$ ) e a massa ao final do ensaio ( $m$ ).

### 3.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE

As análises de estabilidade tiveram como objetivo avaliar a importância relativa das diversas variáveis que influenciam nos processos de ruptura em maciços, de modo a quantificar seus efeitos e entender melhor os fenômenos de ruptura. Neste trabalho as análises envolveram a área da Cava Cachorro Bravo.

O método empregado foi o de análise tensão-deformação. Para isto, utilizou-se o software *Phase<sup>2</sup>6.0*, da Rocscience/ Canadá, o qual modela o maciço rochoso como um meio contínuo, via método dos elementos finitos.

O programa baseia-se em modelagem bidimensional (deformação plana ou axisimétrica), do maciço rochoso, com comportamento elástico ou elasto-plástico. A malha de elementos finitos é gerada automaticamente, com recursos para seu refinamento, sendo necessário definir o tipo de elemento (triangular de 3 ou 6 nós, ou quadrilateral de 4 ou 8 nós), e o número aproximado de nós na fronteira externa e nos locais a serem refinados.

As propriedades mecânicas e os parâmetros de deformabilidade utilizados na modelagem, como ponto de partida para as análises, foram obtidos de relatórios internos da empresa, dados de laboratório e literatura técnica (Hoek & Brown, 1997; Hoek et. al., 2002; Figueiredo e Aquino, 2005).

A ruptura a ser estudada, e já observada na Cava Cachorro Bravo, se deu por flambagem próxima ao pé do talude (“buckling”), ao longo da foliação  $S_2$ . Essa ruptura ocorreu no mês de Julho de 2003, como dito anteriormente na Cava Cachorro Bravo. O fenômeno ao ter iniciado, durou cerca de três dias para que se desenvolvesse. A ruptura por flambagem a ser analisada ocorre em nível de bancada, mas a superfície de ruptura final envolve vários bancos.

As descontinuidades correspondentes à superfície de xistosidade foram introduzidas no modelo manualmente, utilizando-se sua orientação média.

---

**RESULTADOS E DISCUSSÕES**

---

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à caracterização mineralógica (difração de raios-X e análise petrográfica por lâminas delgadas), comportamento geotécnico (índices físicos, ensaio de cisalhamento direto), ensaios de alterabilidade acelerada (ciclagem água-estufa) e análises de estabilidade de uma ruptura ocorrida na Cava Cachorro Bravo por meio de métodos de elementos finitos, através do código *Phase*<sup>2</sup>.

**4.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

A Tabela 6 exhibe, em termos quantitativos, os minerais identificados na análise petrográfica das lâminas delgadas das áreas estudadas. A classificação das rochas analisadas foi Filito Milonitizado. As rochas das quais se obteve as lâminas apresentam foliação milonítica (foliação apresentada por rochas fortemente foliadas e deformadas).

Tabela 6-Análise petrográfica das lâminas delgadas.

Cava	Minerais (%)
Crista	Quartzo (40), Sericita (29), Limonita (30), Muscovita (1), Clorita (traços).
Cachorro Bravo	Quartzo (45), Sericita (25), Limonita (25), Muscovita (5), Clorita (traços).
Cristina	Quartzo (50), Sericita (24), Limonita (25), Muscovita (1), Clorita (traços).

O quartzo é o principal constituinte da rocha analisada, corresponde de 50% a 40%, apresenta-se incolor, com extinção ondulante, com hábito granular e também alongado segundo a foliação milonítica.

A sericita, o segundo principal constituinte encontrado, ocorre sobre a forma de agregados fibrosos e apresenta orientação preferencial planar. A sericita representa um

produto de alteração do feldspato. Este mineral ocorre entre 24% a 29%. Os demais constituintes são limonita, muscovita e clorita.

Chama-se a atenção para a quantidade significativa de quartzo presente nas amostras analisadas, resultados similares também foram verificados em Pinheiro (2002) em uma de suas lâminas e Ferreira (2004), em análises no xisto Sabará, no Morro do Curral em Ouro Preto-MG.

A lâmina referente à amostra da Cava Crista apresenta matriz granolepidoblástica, e ainda, clivagem de crenulação (foliação gerada sobre rocha metamórfica, normalmente rica em filossilicatos, micas, em decorrência de microdobras). Esta estrutura é mostrada na Figura 19.



Figura 19-Clivagem de Crenulação (Cava Crista)

No caso da lâmina referente à amostra da Cava Cachorro Bravo encontram-se “ribbons” (fitas) alongados segundo a foliação milonítica, porfiroblástica com matriz

granolepidoblástica e recristalização dinâmica a qual é responsável pela geração de sub-grãos de quartzo. A Figura 20 exibe estes sub-grãos de quartzo.

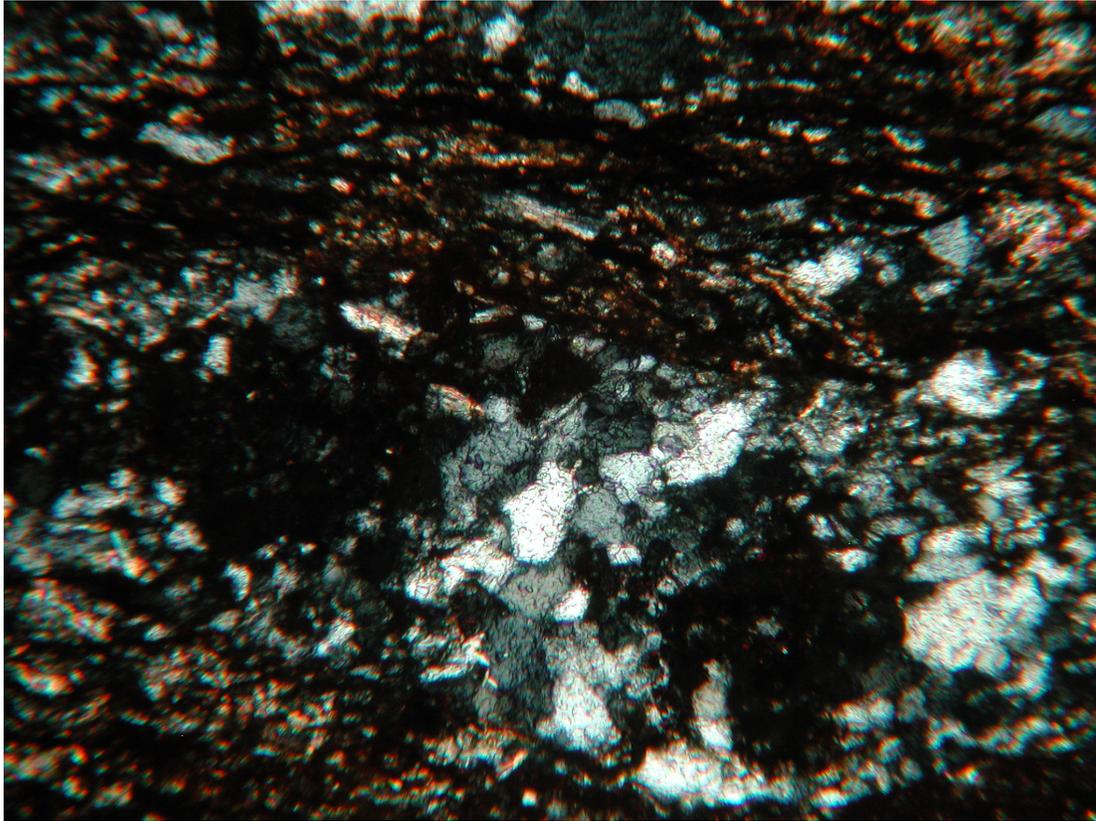


Figura 20- Sub-grãos de quartzo (Cava Cachorro Bravo)

A lâmina referente a Cava Cristina apresenta matriz granolepidoblástica, e bandamento resultante da variação na proporção de quartzo e mica. Este bandamento é mostrado na Figura 21.

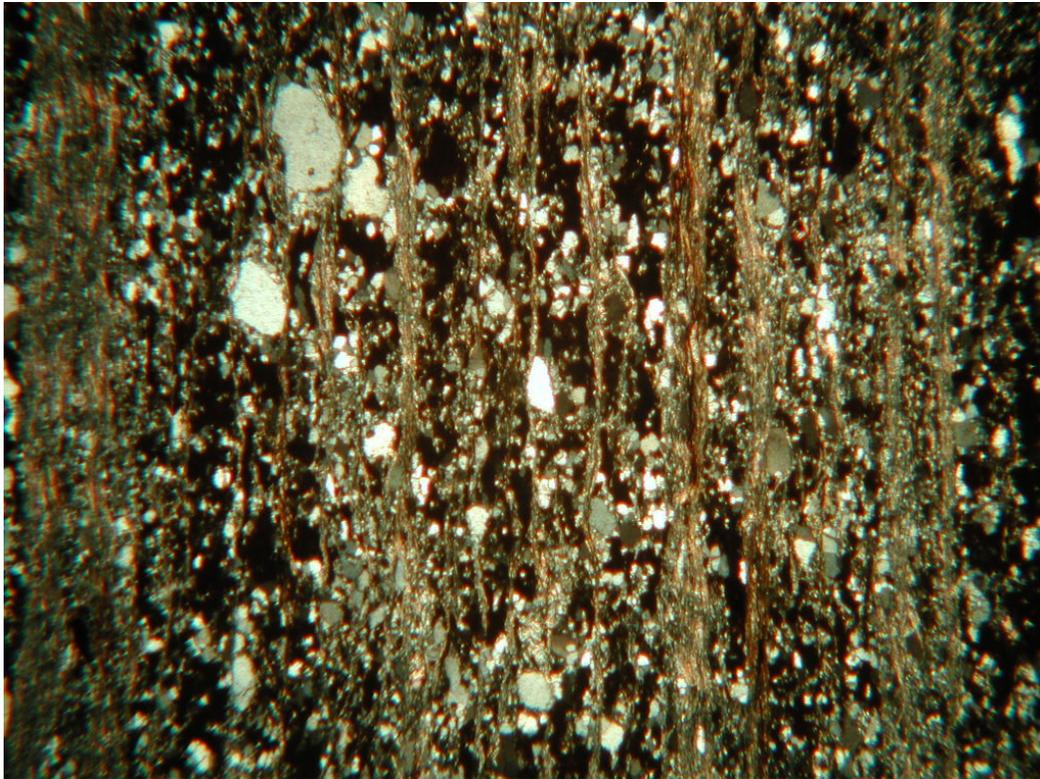


Figura 21- Bandamento resultante da variação da proporção de quartzo e mica (Cava Cristina)

Por meio da análise de difração de raios-X, em amostra de pó total identificou-se qualitativamente os componentes mineralógicos presentes no filito. A Tabela 7 apresenta os minerais identificados nos difratogramas para cada uma das cavas estudadas. Os resultados mostram a presença de quartzo, muscovita e ocorrência do argilomineral caulinita, como produto de alteração. Os difratogramas referentes a cada cava encontram-se no **Anexo 1**.

Tabela 7: Constituintes mineralógicos presentes no filito

Cava	Minerais
Crista	Quartzo, Muscovita e Caulinita
Cachorro Bravo	Quartzo, Muscovita e Caulinita
Cristina	Quartzo, Muscovita e Caulinita

Ferreira (2004) encontrou resultados semelhantes para o xisto estudado no Morro do Curral em Ouro Preto-MG.

Watters (1997) comenta que a caulinita é o mais comum produto de alteração tropical.

## 4.2 COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

### 4.2.1 Índices Físicos

Os resultados referentes aos índices físicos são apresentados na Tabela 8. Nesta tabela constam os resultados de amostras antes do ensaio de alterabilidade e após o ensaio de alterabilidade.

Tabela 8 - Índices Físicos das Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina

Áreas	Amostras antes do ensaio de alterabilidade	Amostras após o ensaio de alterabilidade
Cava Crista	$G_s=2,78$ $\gamma=22,46\text{kN/m}^3$ $\gamma_d=21,68\text{kN/m}^3$ $n=20,50\%$ $e=0,26$	$G_s=2,78$ $\gamma_d=21,38\text{kN/m}^3$ $n=21,58\%$ $e=0,28$
Cava Cachorro Bravo	$G_s=2,75$ $\gamma=19,62\text{kN/m}^3$ $\gamma_d=18,63\text{kN/m}^3$ $n=30,90\%$ $e=0,44$	$G_s=2,75$ $\gamma_d=17,66\text{kN/m}^3$ $n=34,54\%$ $e=0,52$
Cava Cristina	$G_s=2,71$ $\gamma=19,72\text{kN/m}^3$ $\gamma_d=19,22\text{kN/m}^3$ $n=27,67\%$ $e=0,38$	$G_s=2,71$ $\gamma_d=18,93\text{kN/m}^3$ $n=28,78\%$ $e=0,40$

Verifica-se pela Tabela 8 uma variação na porosidade, índices de vazios e peso específico seco (mais acentuada na Cava Cachorro Bravo). Pode-se dizer que um aumento na porosidade, índice de vazios e uma redução no peso específico seco são indicadores do processo de alteração, reflexo da velocidade de alteração no tempo. O aumento na porosidade e no índice de vazios favorecerá a percolação de água na rocha e conseqüentemente a sua desintegração.

Tanto a porosidade quanto o peso específico seco apresentaram uma variação pequena, a qual pode ser resultante do baixo número de ciclos de umedecimento e secagem experimentados pelas amostras.

Com relação à densidade relativa dos grãos, esta representa uma forma de comparar a mineralogia relativa das amostras. Se determinadas amostras apresentam valores similares para a densidade relativa dos grãos, percebe-se que os constituintes mineralógicos destas amostras são similares. Isto é verificado pela caracterização mineralógica apresentada anteriormente para as Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina, que apresentam os mesmos constituintes mineralógicos.

#### **4.2.2 Ensaio de Cisalhamento Direto**

As Figuras 22 e 23 (tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal e deslocamento vertical x deslocamento horizontal) expressam os resultados das Cavas Crista, Cachorro Bravo e Cristina, obtidos a partir dos ensaios de cisalhamento direto realizados na direção paralela à superfície xistosidade. Identifica-se por estas figuras a tensão de ruptura de pico e a tensão residual.

Verificou-se para as áreas estudadas uma queda acentuada da tensão após o pico de resistência ser atingido, resultando em um comportamento frágil, como pode ser visto pela Figura 22 (tensão cisalhante x deslocamento).

Ferreira (2004) encontrou para o xisto Sabará, Morro do Curral, um comportamento dúctil, que pode ser atribuído a um maior grau de alteração desse material em relação ao material das cavas analisadas.

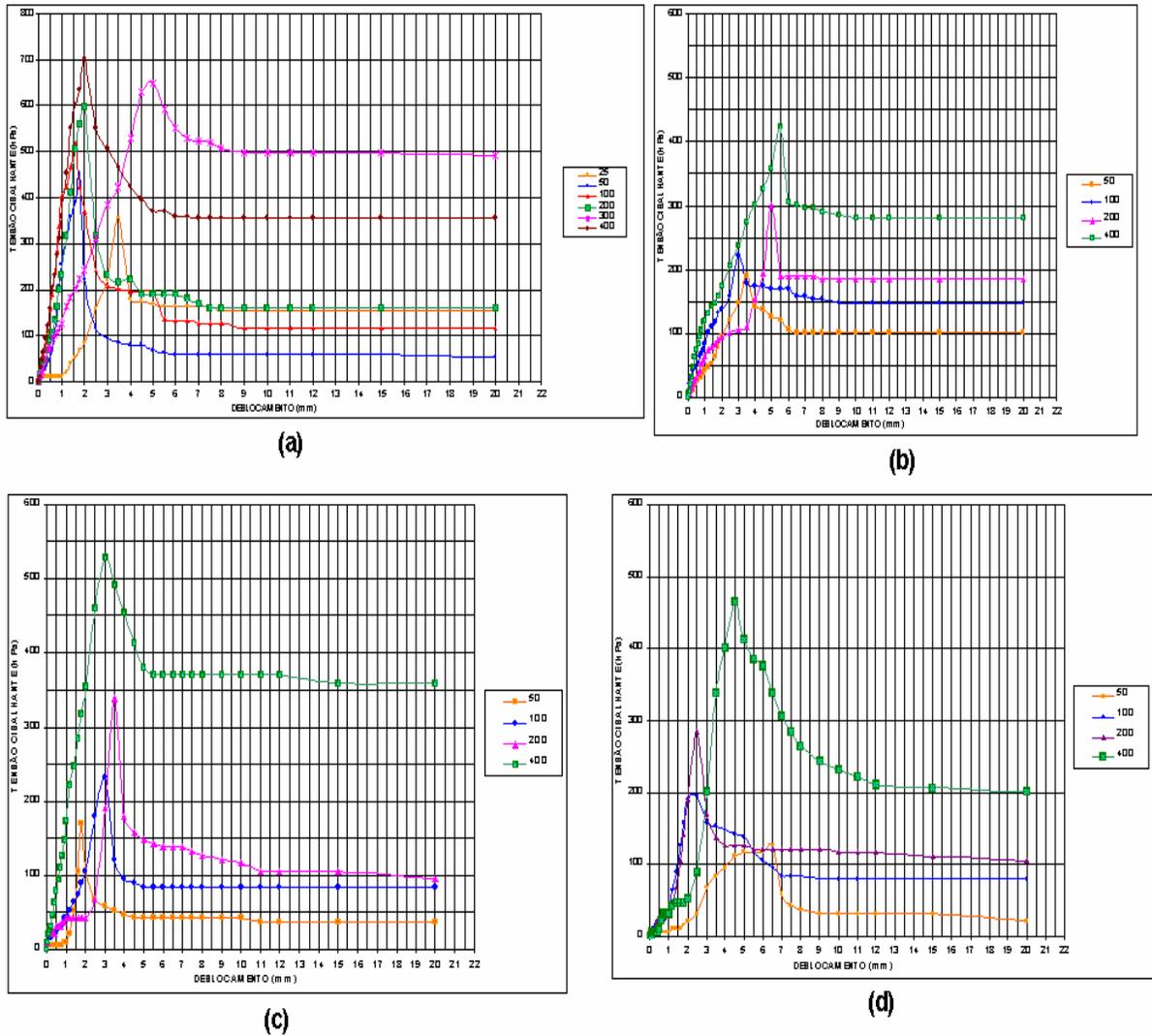
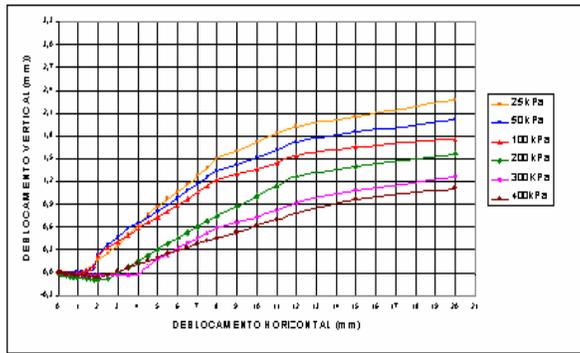
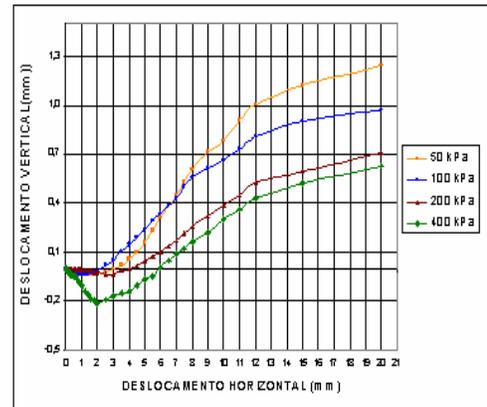


Figura 22- Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal. ((a) Cava Crista, (b) Cava Cachorro Bravo, (c) e (d) Cava Cristina antes e após ensaio de alterabilidade, respectivamente)

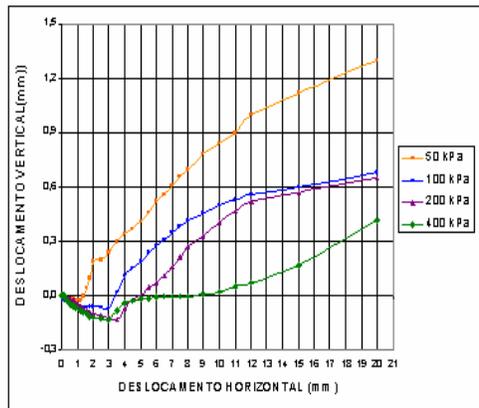
Quanto ao deslocamento vertical, todos os corpos de prova apresentaram uma pequena contração (0,09mm para as amostras da Cava Crista, 0,22mm para as amostras da Cava Cachorro Bravo e para Cava Cristina 0,13mm (amostras sem ciclagem) e 0,11mm (amostras que experimentaram ciclos alternados de umedecimento e secagem)). A Figura 23 mostra a variação do deslocamento vertical com o deslocamento horizontal.



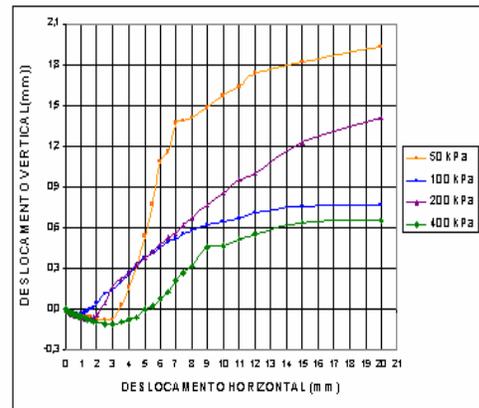
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 23- Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal ((a) Cava Crista, (b) Cava Cachorro Bravo e(c) e (d) Cava Cristina antes e após ensaio de alterabilidade, respectivamente)

As amostras da Cava Crista são caracterizadas pela presença de rugosidades na superfície das juntas, o que tende por aumentar a resistência do maciço.

Para a Cava Crista o início da expansão ocorre antes do ponto de ruptura ser atingido para tensões de 25, 50 e 100kPa, o que não se observa para as tensões de 200 e 400kPa, onde esta expansão inicia-se a partir do ponto de ruptura e para o nível de tensão de 300kPa a expansão é verificada próxima à ruptura. À medida que se aumenta o nível de tensão menor é a expansão e mais demorado é seu início. A expansão anterior à ruptura verificada para níveis mais baixos de tensão normal é explicada pela presença da rugosidade.

As ondulações em superfícies de juntas naturais têm uma influência significativa no comportamento cisalhante. As superfícies rugosas, geralmente, aumentam a resistência ao cisalhamento, e este aumento é extremamente importante em termos de estabilidade do maciço.

Devido à presença de rugosidade nas amostras desta área, estudou-se a possibilidade de adotar-se um ajuste bi-linear, considerando o critério de Patton (1966) *apud* Goodman (1989). Porém os resultados obtidos se ajustaram melhor a uma envoltória de resistência curvilínea. Como salientado por Brady & Brown (1985) a envoltória de resistência tende a ser curvilínea e não o modelo idealizado bi-linear.

A Figura 24 exibe uma amostra da Cava Crista cisalhada.



Figura 24 - Amostra de Cava Crista cisalhada

Para a Cava Crista adotou-se uma curva de potência com a seguinte equação:  $\tau = a\sigma^b$ , onde  $a = 172,01$  e  $b = 0,2357$ , ou seja,

$$\tau = 172,01\sigma^{0,2357} \quad (15)$$

Em muitos maciços rochosos a envoltória de ruptura, particularmente em baixos níveis de tensão normal, é não linear. A relação entre as tensões normal e cisalhante para o caso de envoltórias curvilíneas pode ser descrita pelo modelo de curva de potência.

A Figura 25 mostra a curva de potência determinada para a Cava Crista. Ainda com relação a esta área, determinou-se os parâmetros equivalentes de Mohr-Coulomb considerando-se a altura da bancada de 15m:

-coesão de 395,53kPa;

-ângulo de atrito igual a 40°.

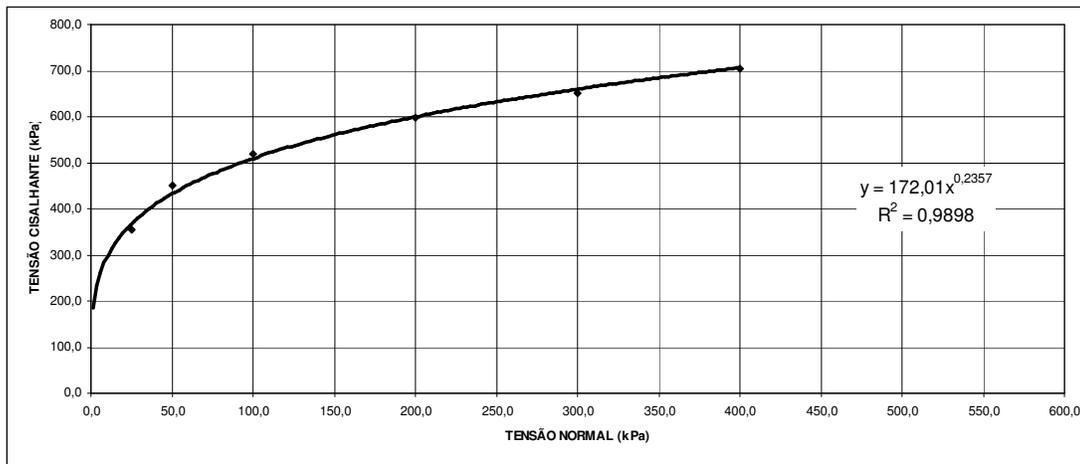


Figura 25-Envoltória de Resistência (Cava Crista)

No caso da Cava Cachorro Bravo a expansão (aumento em volume) ocorre próximo à ruptura para todos os corpos de prova ensaiados. Nenhum sinal de irregularidade ou ondulação foi verificado nas amostras ensaiadas, o que explica a não ocorrência de expansão antes da ruptura. O plano de xistosidade é planar.

Após a ruptura a expansão torna-se mais elevada, assim como observado na Cava Crista, não mais verificando contração.

Na área da Cava Cachorro Bravo, em uma porção onde ocorreu deslizamento, verificou-se em campo uma superfície escorregadia, através da qual ocorreu o movimento (superfície espelhada). Essa superfície espelhada tem um efeito significativo nas propriedades do maciço, causando anisotropia (Hudson & Harrison, 1997).

Diante do exposto, adotou-se para esta área, o critério de ruptura de Mohr-Coulomb ( $\tau=c+\sigma\text{tg}\phi$ ), com a ruptura ocorrendo segundo a xistosidade. A Figura 26 mostra o detalhe de um bloco após o ensaio de cisalhamento.



Figura 26- Detalhe do bloco da Cava Cachorro Bravo

Os valores dos parâmetros de resistência encontrados foram:

-coesão de 158,94kPa, e;

-ângulo de atrito igual a 33,77°.

A Figura 27 apresenta a envoltória de resistência segundo o critério de Mohr-Coulomb para a Cava Cachorro Bravo.

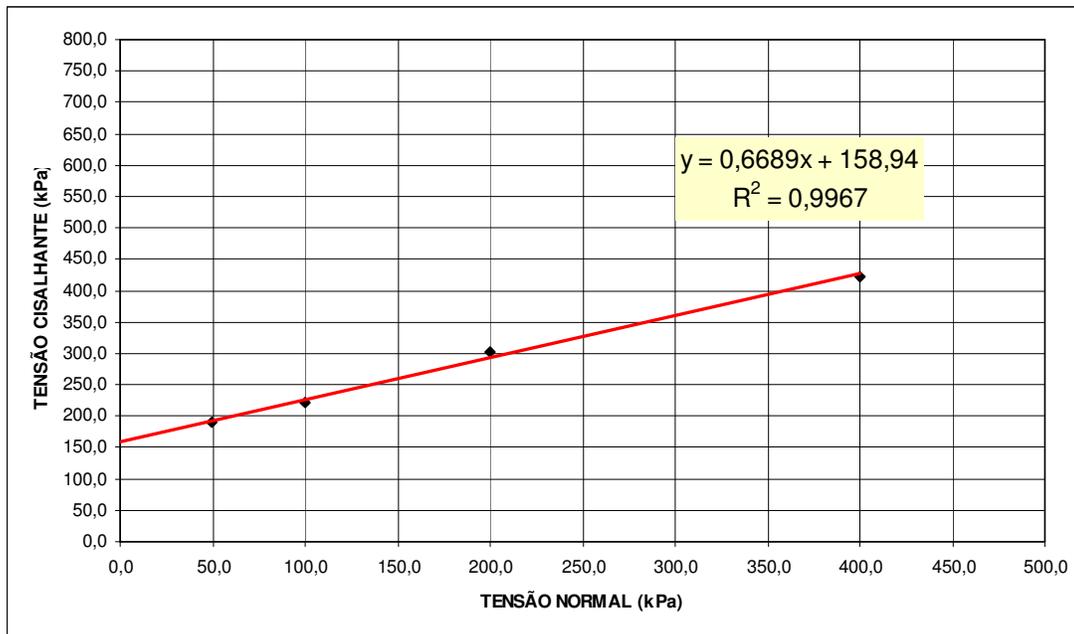


Figura 27-Envoltória de Resistência para a Cava Cachorro Bravo

Estes valores obtidos encontram-se distantes daqueles apresentados por Hunt (1984) para filitos cisalhados, na direção paralela à descontinuidade, na condição de solo residual, cuja coesão é nula e o ângulo de atrito é 18°.

Segundo Brady & Brown (1985), o valor do ângulo de atrito obtido representa um valor típico de rochas ricas em quartzo. Através da análise mineralógica, por meio de descrição de lâminas delgadas, observou-se aproximadamente 45% de quartzo.

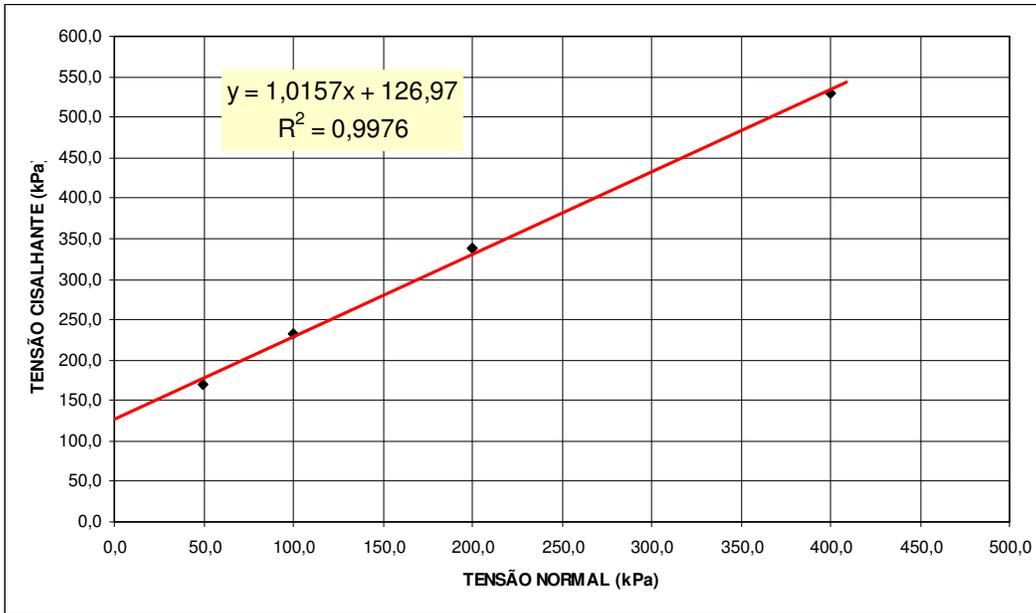
Figueiredo e Aquino (2005) adotaram um ângulo de atrito de 32,2° para o filito sericítico da MBR (Minerações Brasileiras Reunidas), o qual se encontra próximo ao obtido nas amostras da Cava Cachorro Bravo, por meio do ensaio de cisalhamento direto.

Nas amostras da Cava Cristina verificou-se que a expansão ocorre após o ponto de ruptura ser atingido. Porém para a mesma área efetuando-se ensaios de cisalhamento direto após o ensaio de alterabilidade este padrão não se repete. Para tensões de 50 e 100kPa o início da expansão ocorre antes do ponto de ruptura ser alcançado, o que não se observa para tensões de 200 e 400kPa. Para o nível de tensão de 200kPa a expansão coincide com a ruptura e para 400kPa esta ocorre posteriormente a esta.

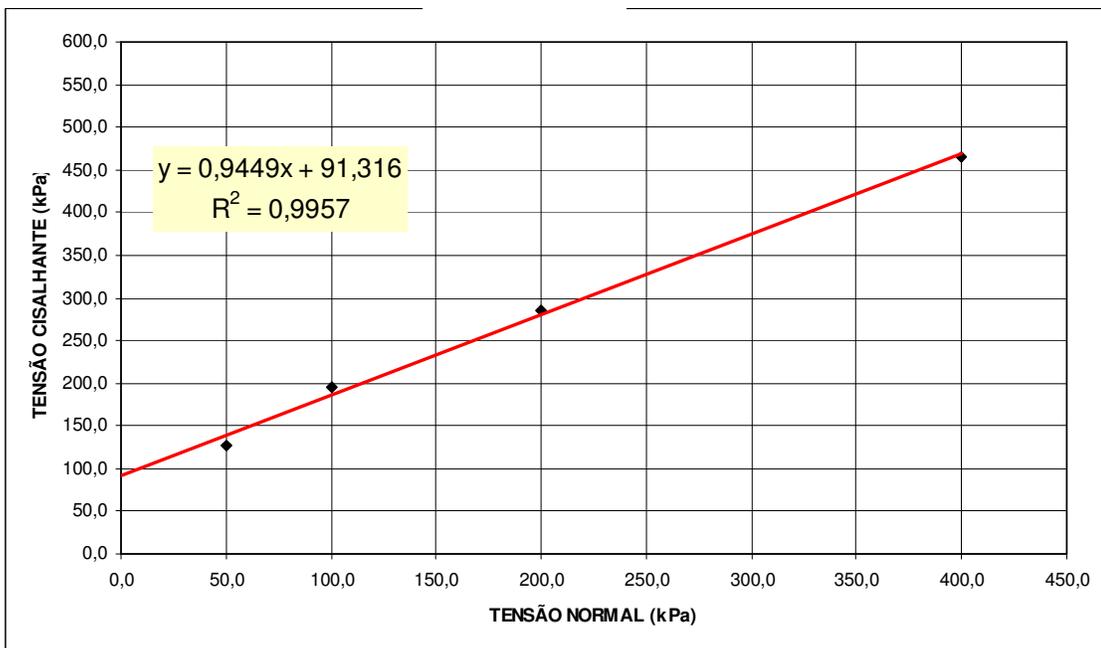
O início no aumento de volume, nestas áreas, pode estar associado à iniciação e propagação de trincas, correspondendo a dilatância (Goodman, 1989).

Os resultados do ensaio de cisalhamento direto das amostras da Cava Cristina mostraram coesão de 126,97 kPa e ângulo de atrito de  $45,5^\circ$  ; e coesão de 91,32kPa e ângulo de atrito de  $43,4^\circ$  após ciclagem. Observa-se significativa queda da coesão após a realização dos ensaios de alterabilidade (Figuras 28a e 28b, respectivamente), resultante da perda de material de preenchimento, afetando a resistência ao cisalhamento na superfície de xistosidade.

Com relação ao ângulo de atrito a variação é muito pequena, supõe-se que com o carregamento do material mais fino pelo ensaio de alterabilidade a resistência seja governada pelo contato entre grãos minerais, quartzo. Observou-se que entre as placas das amostras a presença acentuada de grãos de quartzo. Este entrosamento entre os grãos minerais resultaria no alto ângulo de atrito.



(a)



(b)

Figura 28-Envoltória de Resistência para a Cava Cristina ((a) antes do ensaio de alterabilidade e (b) após o ensaio de alterabilidade)

É importante ressaltar que a não determinação dos parâmetros de resistência após o ensaio de ciclagem água-estufa (ensaio de alterabilidade) para as outras áreas estudadas deve-se ao estado avançado de degradação apresentado pelas amostras, impossibilitando a realização dos ensaios de cisalhamento direto.

#### **4.3 ENSAIO DE ALTERABILIDADE ACELERADA (ciclagem água-estufa)**

Realizaram-se ensaios de alterabilidade (ciclagem água-estufa) para as amostras das áreas Cava Crista, Cava Cachorro Bravo e Cava Cristina.

Através da Tabela 9 gerou-se o gráfico que traz a relação entre a perda de massa e número de ciclos experimentados pelos blocos da Cava Crista (Figura 29).

Tabela 9 - Perda de massa em amostras da Cava Crista

CICLO	MASSA DA AMOSTRA (g)			
	1	2	3	4
1	795,24	842,99	861,08	870,99
2	794,34	842,00	860,80	870,57
3	794,13	841,98	860,23	870,26
4	794,05	841,88	860,23	870,11
5	793,96	841,88	860,12	869,98
6	793,46	841,27	859,50	869,49
7	793,31	841,18	859,50	869,25
8	793,28	840,96	859,46	869,18
9	792,94	840,55	858,96	868,74
10	792,91	840,55	858,96	868,74
11	792,74	840,40	858,78	868,60
12	792,74	840,40	858,78	868,60
13	792,56	840,32	858,71	868,60
14	792,50	840,28	858,69	868,60
15	792,18	840,04	858,66	868,60
16	792,18	840,04	858,66	868,53
17	792,18	839,91	858,39	868,24
18	792,18	839,91	858,39	868,23
19	792,04	839,88	858,32	868,22
20	792,04	839,88	858,32	868,22
21	792,04	839,88	858,32	868,22
22	792,04	839,88	858,32	868,22
23	792,04	839,88	858,32	868,22
24	792,04	839,88	858,32	868,22
25	792,04	839,88	858,32	868,22
26	792,00	839,82	858,32	868,21
27	791,98	839,80	858,30	868,18
28	791,97	839,75	858,25	868,07
29	791,96	839,71	858,23	868,03
30	791,93	839,69	858,18	867,98

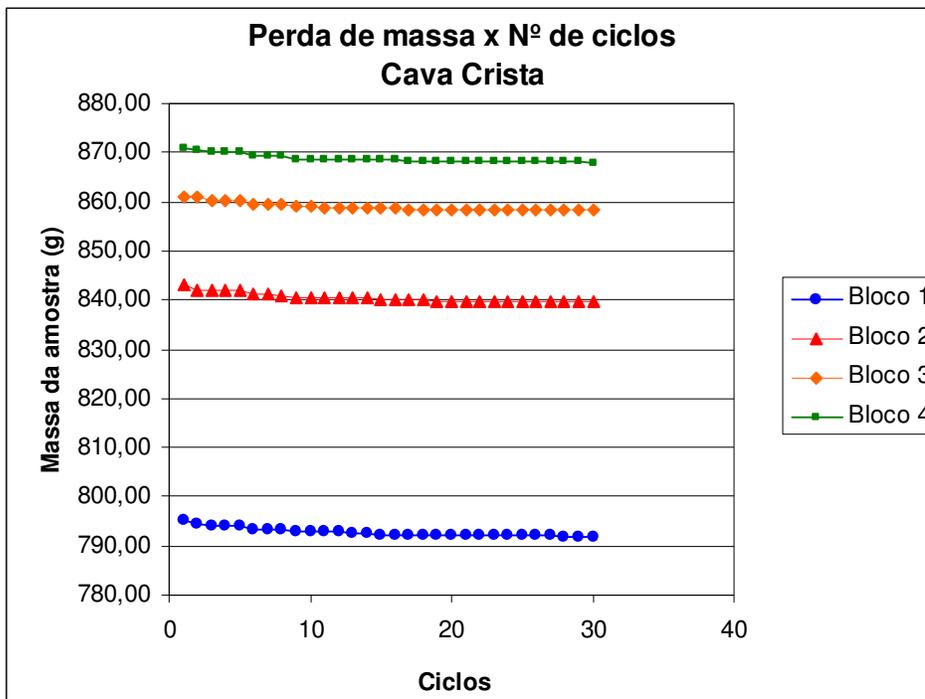


Figura 29- Representação da perda de massa por ciclo da Cava Crista

Pode-se verificar que todas as amostras apresentaram uma pequena perda de massa no início do ensaio, estabilizando com o decorrer do mesmo. Algumas delas apresentaram pequenas rachaduras, iniciadas em torno do 15º ciclo. Estas rachaduras são resultado da remoção do material de preenchimento (Figura 30).

A perda de massa média, após o ensaio foi de 0,38%, como mostrado na Tabela 10.

Tabela 10- Perda de Massa (%) das amostras da Cava Crista

Cava Crista	Perda de Massa (%)
Bloco1	0,42
Bloco2	0,39
Bloco3	0,34
Bloco4	0,35
<b>Média</b>	<b>0,38</b>

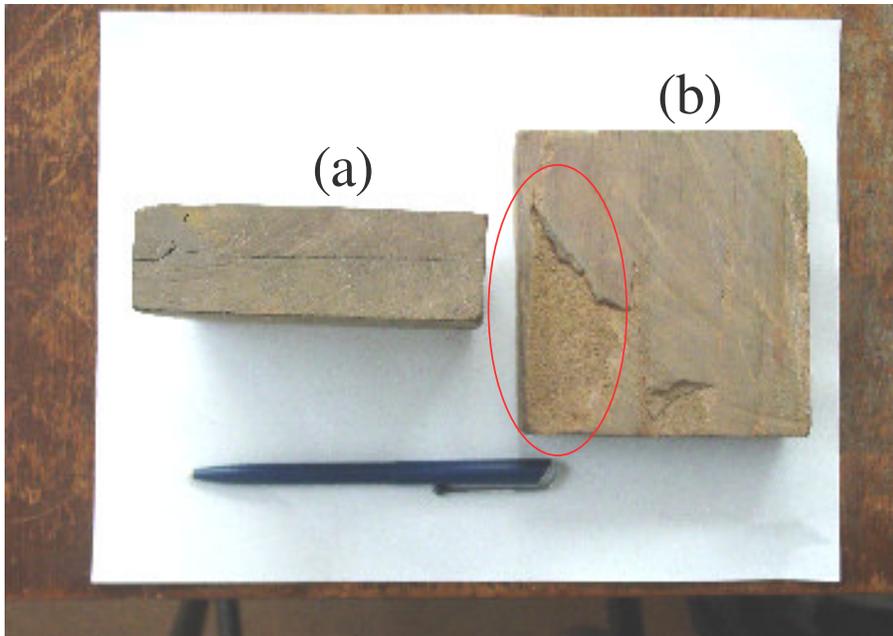


Figura30- Blocos da Cava Crista após 30 ciclos ((a) surgimento de rachadura ao longo da superfície, (b) detalhe para o material de preenchimento)

No caso das amostras da Cava Cachorro Bravo, observa-se um comportamento similar ao das amostras da Cava Crista, ou seja, todas as amostras apresentaram uma pequena perda de massa no início do ensaio, estabilizando com o decorrer do mesmo, como apresentado na Figura 31 (perda de massa *versus* número de ciclos).

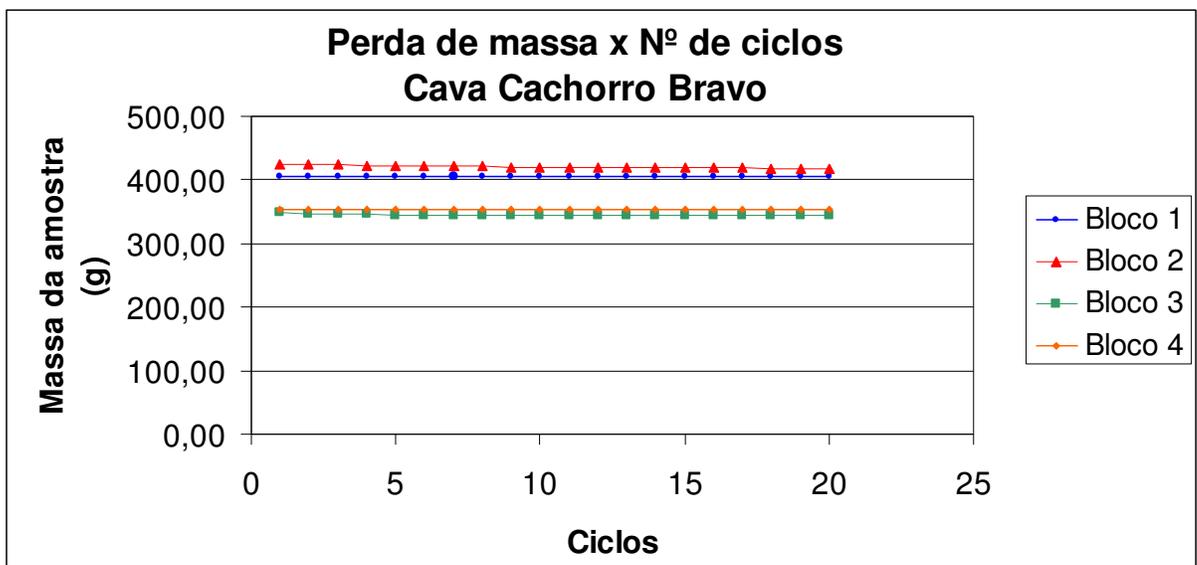


Figura 31- Representação da perda de massa por ciclo da Cava Cachorro Bravo

O gráfico da Figura 31 foi obtido através da Tabela 11, a qual mostra a perda de massa nas amostras desta área.

Tabela 11 - Perda de massa em amostras da Cava Cachorro Bravo

CICLOS	MASSA DA AMOSTRA (g)			
	1	2	3	4
1	406,57	425,05	348,02	354,52
2	406,10	424,34	345,93	354,40
3	406,09	424,03	345,65	354,21
4	405,99	423,25	345,54	354,10
5	405,97	423,11	345,45	354,06
6	405,94	422,68	345,38	353,96
7	405,93	422,26	345,29	353,90
8	405,93	421,00	345,27	353,88
9	405,92	420,90	345,25	353,85
10	405,91	420,51	345,23	353,83
11	405,90	420,17	345,18	353,80
12	405,88	419,47	345,10	353,72
13	405,87	419,34	345,00	353,61
14	405,85	419,20	344,90	353,57
15	405,84	419,01	344,85	353,52
16	405,80	418,98	344,79	353,51
17	405,77	418,95	344,74	353,50
18	405,73	418,48	344,71	353,46
19	405,71	418,36	344,69	353,45
20	405,67	418,20	344,67	353,44

A perda de massa média, após o ensaio foi de 0,77%, como observado na Tabela 12.

Tabela 12-Perda de massa (%) das amostras da Cava Cachorro Bravo

Cava Cachorro Bravo	Perda de Massa (%)
Bloco1	0,22
Bloco2	1,61
Bloco3	0,96
Bloco4	0,30
<b>Média</b>	<b>0,77</b>

A Figura 32 mostra um bloco da Cava Cachorro Bravo após a ciclagem água-estufa apresentando sinais de fragmentação.



Figura 32- Blocos da Cava Cachorro Bravo após 20 ciclos de umedecimento e secagem em estufa

Cabe ressaltar que muitas amostras não suportaram sequer 3 ciclos, havendo um número acentuado de amostras perdidas.

No caso das amostras da Cava Cachorro Bravo observou-se uma maior perda de massa média, se comparado às de Cava Crista.

Embora seja verificada uma perda percentual em massa maior para a Cava Cachorro Bravo, os valores são muito pequenos para ambas as áreas. Como comentado anteriormente, o número de ciclos de umedecimento e secagem foi baixo, quando comparado ao recomendado pela CESP (1990). Após esse número pequeno de ciclos as amostras se desintegraram totalmente na maioria dos ensaios, o que impossibilitou a sua continuidade.

Com o decorrer dos ensaios verificou-se para as amostras estudadas um aumento no número e tamanho de trincas, facilitando o aumento na quantidade de água absorvida.

A partir da Tabela 13 gerou-se o gráfico perda de massa *versus* número de ciclos para a Cava Cristina (Figura33).

Tabela 13- Perda de massa em amostras da Cava Cristina

CICLO	MASSA DA AMOSTRA (g)				
	1	2	3	4	5
1	815,86	829,73	822,19	807,79	785,63
2	812,68	828,35	820,23	804,76	783,18
3	811,59	827,70	819,68	803,76	781,64
4	799,02	827,37	819,36	801,73	780,09
5	797,75	827,01	818,80	801,21	779,10
6	797,63	826,83	818,69	800,87	777,39
7	797,13	826,83	818,61	800,52	777,15
8	796,85	826,51	818,48	799,86	776,79
9	795,15	826,44	817,62	797,47	774,71
10	795,15	825,44	817,62	797,31	773,87
11	794,93	825,34	817,60	797,04	773,28
12	794,41	825,14	817,35	794,95	772,56
13	794,41	825,14	817,35	794,81	772,24
14	793,94	824,80	816,91	794,32	771,42
15	793,89	824,78	816,91	794,15	771,01
16	793,87	824,72	816,91	794,07	770,84
17	793,51	824,58	816,51	793,65	770,40
18	793,45	824,46	816,51	793,35	769,00
19	792,95	824,24	816,20	792,96	768,04
20	792,95	824,24	816,20	792,87	768,04
21	792,95	824,24	816,20	792,87	768,04
22	792,58	823,90	815,86	791,93	766,37
23	792,58	823,90	815,77	791,70	766,18
24	791,95	823,72	815,68	791,16	765,43
25	791,95	823,72	815,16	790,88	765,43
26	791,95	823,72	815,16	790,88	765,43
27	791,58	823,72	815,16	790,39	761,70
28	791,31	823,72	815,16	790,39	759,07
29	790,81	823,16	815,15	789,65	757,94
30	790,42	823,14	815,13	789,60	757,84

Na Figura33, perda de massa *versus* número de ciclos, observa-se o mesmo padrão dos anteriores, com exceção dos blocos 1 e 5, onde o primeiro apresenta uma queda acentuada no início do ensaio enquanto no último esta queda é verificada já próximo ao final do ensaio. Estes blocos apresentaram além de rachaduras, lasqueamento na borda, representados na Figura 34.

Em todas as amostras percebeu-se nitidamente a perda do material de preenchimento.

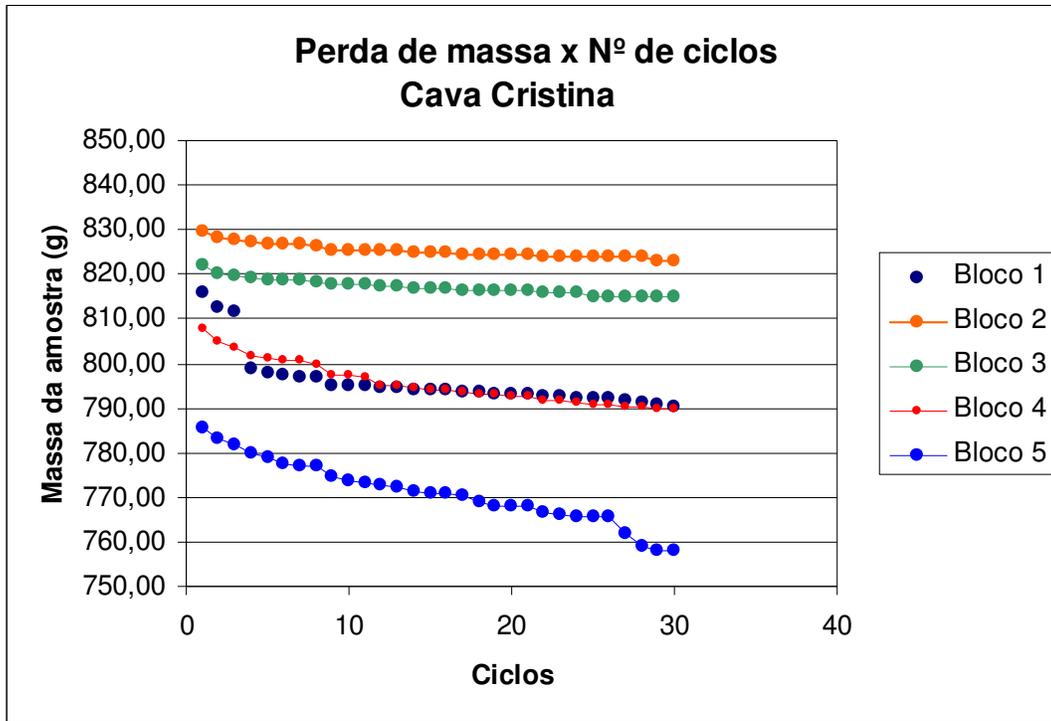


Figura 33- Representação da perda de massa por ciclo da Cava Cristina

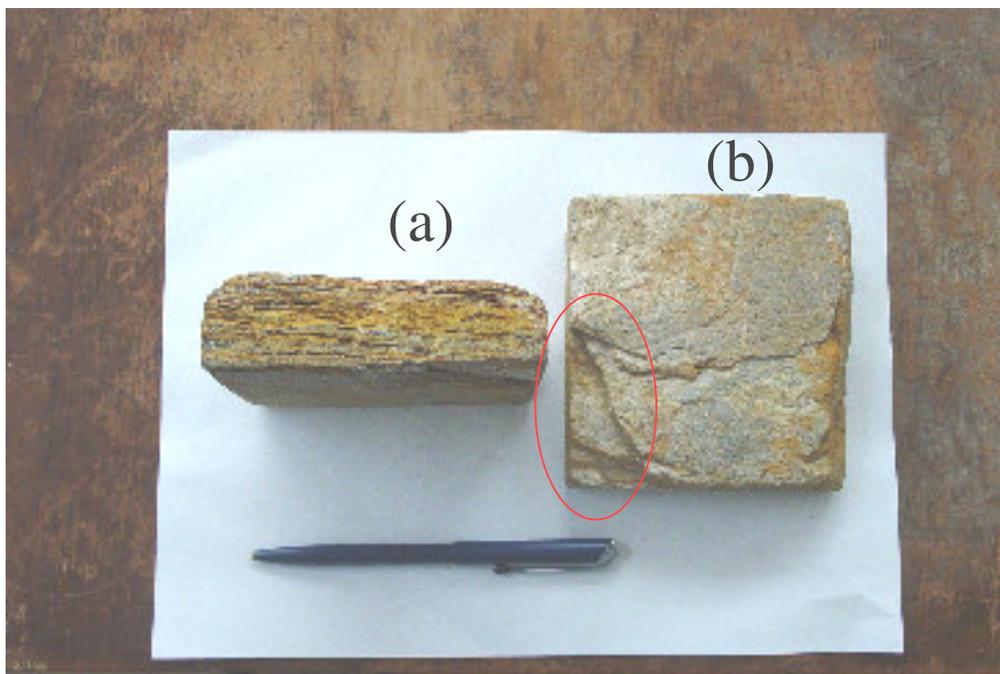


Figura34- Blocos da Cava Cristina após 30 ciclos (( a) grande espaçamento entre as placas, (b) lasqueamento na borda do bloco)

As amostras da Cava Cristina tiveram uma perda de massa mais acentuada em relação às amostras da Cava Crista, perda de massa de 2,11% (Tabela14).

Tabela 14-Perda de massa (%) das amostras da Cava Cristina

Cava Cristina	Perda de Massa (%)
Bloco1	3,12
Bloco2	0,79
Bloco3	0,86
Bloco4	2,25
Bloco5	3,54
<b>Média</b>	<b>2,11</b>

Em todos os casos, os fatores físicos tiveram um maior destaque em relação aos fatores químicos.

#### **4.4 ANÁLISE DE ESTABILIDADE**

O modelo computacional utilizando o código de elementos finitos *Phase<sup>2</sup>* destinou-se a analisar a ruptura ocorrida, como já citado anteriormente, na Cava Cachorro Bravo em Julho/2003. A ruptura ocorrida envolveu vários bancos, como pode ser visto pela Figura 35 e pelo mapa da Figura 36, onde é mostrada a superfície mapeada pela empresa. Porém este trabalho foca-se na análise da ruptura por flambagem, não detalhando os outros tipos de ruptura ocorridos.



Figura 35- Ruptura ocorrida na Cava Cachorro Bravo

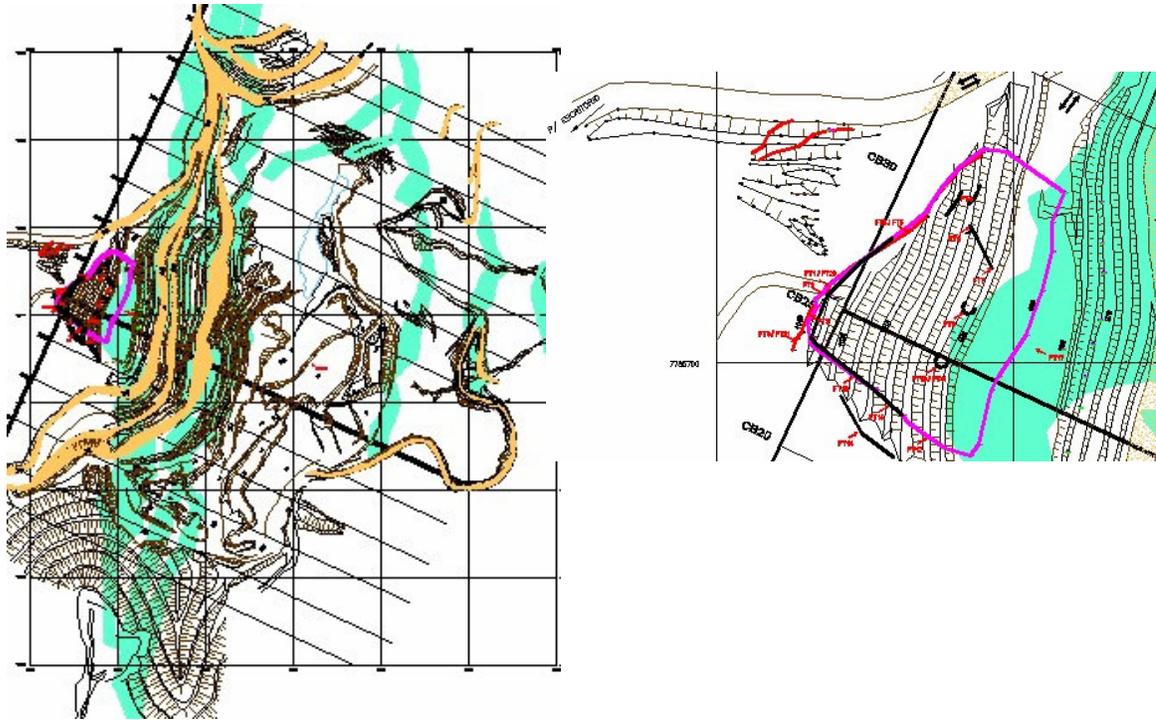


Figura 36- Mapa Geológico da Cava Cachorro Bravo e extensão da área de ruptura

A partir da seção fornecida pela empresa com a geometria do modelo (topografia e geologia), foram colocadas as fraturas representando a superfície de descontinuidade. As fraturas foram inseridas no modelo com a inclinação de  $61^\circ$  e direção paralela à do talude, correspondente à sua orientação média. A colocação das fraturas no modelo visou o estudo da ruptura por flambagem, observada no local (Figura 37). Na análise o objetivo era entender e procurar reproduzir o mecanismo de ruptura o mais fielmente possível, como citado anteriormente. Como referência tem-se a medida de deslocamento horizontal produzido pela ruptura por flambagem, de 0,4m, ou seja, deslocamento verificado na placa em que ocorreu a ruptura.

As dimensões da malha seguiram recomendações de Sjöberg (1999): verticalmente de 2 a 3 vezes a altura total e, 3 a 4 vezes a largura escavada. Para o caso em estudo adotou-se aproximadamente 3 vezes a altura total e horizontalmente 4 vezes a largura da escavação.



Figura 37- Ruptura por flambagem ocorrida na Cava Cachorro Bravo

A malha foi gerada a partir de várias tentativas, utilizando-se os recursos de otimização de malha presentes no *Phase<sup>2</sup>*. Obteve-se 3752 elementos triangulares, como mostrado na Figura 38. Nesta figura é apresentado além do filito o dique básico encontrado na área da Cava Cachorro Bravo.

Durante as análises buscou-se obter um ajuste entre os resultados do modelo de elementos finitos (*Phase<sup>2</sup>*) e o que se verificou em campo. A magnitude de deslocamento (horizontal) no modelo deveria ficar próxima a 0,4m, valor observado em campo a época da ruptura.

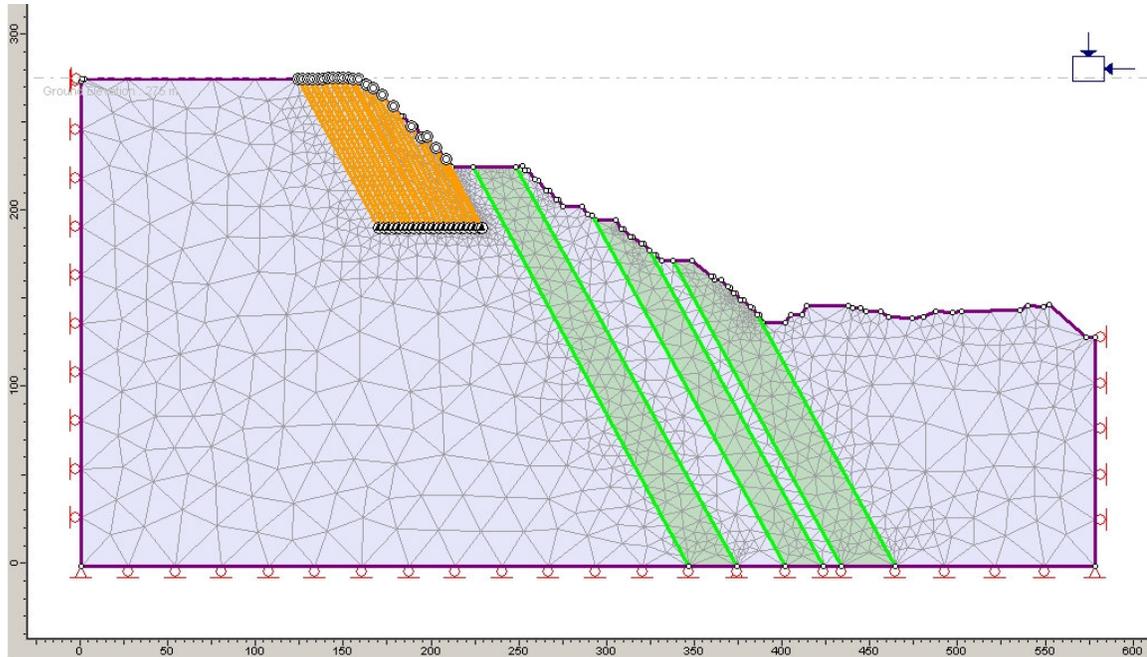


Figura 38-Modelo computacional para a análise

O carregamento constou de um campo de tensões iniciais (*in situ*), com carregamento gravitacional. Adotaram-se tensões verticais ( $\sigma_v$ ) e horizontais ( $\sigma_H$ ) como componentes principais do campo de tensões *in situ*. Estas variam com a profundidade ( $z$ ) segundo a hipótese litostática usualmente adotada:  $\sigma_v = \gamma z$  e  $\sigma_H = k \gamma z$ , onde  $k$  é uma constante e  $\gamma$  o peso específico da rocha (Goodman, 1989; Hoek, 2001). Sendo para este caso o valor do peso específico de  $0,02 \text{ MN/m}^3$ . Variou-se o valor de  $k$  (tensões horizontais médias/tensão vertical) de 1,0 a 1,5. O valor para  $k$  igual a 1,5 foi o que melhor representou a situação observada em campo, em termos de deslocamentos.

Para o caso estudado utilizou-se o modelo constitutivo elasto-plástico de Mohr-Coulomb. Os parâmetros de resistência para o maciço rochoso requeridos no *Phase<sup>2</sup>* para o modelo elasto-plástico são:

- coesão de pico ( $c_p$ ) e residual ( $c_r$ );
- ângulo de atrito de pico ( $\phi_p$ ) e residual ( $\phi_r$ ) e;
- resistência à tração ( $\sigma_t$ ).

As propriedades mecânicas iniciais utilizadas são de relatórios internos da empresa, literatura técnica (Hoek & Brown, 1997; Bieniawski, 1989; Hoek et.al, 2002; Figueiredo e Aquino, 2005).

Adotou-se o modelo elasto-plástico no processo de análise de estabilidade por melhor corresponder à realidade física do problema e fornecer melhores indicadores de instabilidade em relação ao modelo elástico.

Com relação ao filito adotou-se um valor inicial de coesão de pico ( $c_p$ ) de 0,4MPa (Figueiredo e Aquino, 2005) e ângulo de atrito ( $\phi_p$ ) de 22° (valor que se encontra na Classe IV- Bieniawski,1989). Após ajustes na resistência do filito para representar o melhor possível à realidade observada em campo, chegou-se à conclusão que os valores supracitados são adequados. Para a rocha básica partiu-se de valores de ensaios de resistência realizados pela empresa e ajustou-se ao modelo adotando 0,41MPa de coesão de pico e 31° para o ângulo de atrito.

Os valores de coesão e ângulo de atrito estimados através da classificação de Bieniawski (1989) para o maciço rochoso forneceram resultados incoerentes, daí terem sido desconsiderados.

No caso dos parâmetros residuais adotou-se perda completa de coesão pós-pico e ângulo de atrito igual a 15° para filito e 20° para a rocha básica, após ajustes no modelo.

Para a determinação da resistência à tração ( $\sigma_t$ ) realizou-se uma estimativa e esta correspondeu a 1/10 da resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ), dada pelo critério de Mohr-Coulomb. (Goodman,1989).

Os valores adotados no modelo foram:

-filito: 0,12MPa e;

-rocha básica: 0,14MPa.

O módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) foram determinados da seguinte forma: o primeiro a partir da expressão (Hoek et al. 2002).

$$E = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10/40)} \quad (16)$$

Onde:  $\sigma_{ci}$ = resistência à compressão uniaxial da rocha intacta;

D= fator de perturbação (no caso em estudo: zero);

GSI= índice de resistência geológica (*Geological Strength Index*).

O GSI foi determinado a partir do valor de RMR (*Rating Mass Rock*), o qual tem valor de 38. Onde o GSI é calculado pela expressão abaixo:

$$GSI = RMR_{89} - 5 \quad (17)$$

Para o filito obteve-se o módulo de elasticidade de 3,03GPa e para a rocha básica 3,3GPa.

O coeficiente de Poisson foi determinado por meio de dados de relatórios internos da empresa, sendo os valores de 0,2 para o filito e 0,4 para a rocha básica.

No que diz respeito ao ângulo de dilatância ( $\psi$ ), a literatura apresenta apenas sugestões qualitativas, conforme Hoek & Brown (1997). Neste modelo adotou-se o valor de zero para o ângulo de dilatância.

As propriedades das juntas requeridas no modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb no programa *Phase<sup>2</sup>* são: coesão de pico ( $c$ ), ângulo de atrito de pico ( $\phi$ ) e resistência à tração ( $\sigma_{ij}$ ). Os valores de coesão e ângulo de atrito foram obtidos do ensaio de cisalhamento direto realizado no Laboratório de Geotecnia da UFOP. A resistência à tração foi assumida nula. Os valores foram 0,159MPa de coesão de pico e 33,7° de ângulo de atrito de pico.

Com relação aos parâmetros de deformabilidade das juntas/interfaces, são os seguintes:

- rigidez normal da junta ( $k_n$ );
- rigidez cisalhante da junta ( $k_s$ ).

Estes parâmetros relacionam tensões e deslocamentos nas direções normal e tangencial, respectivamente, tendo unidades de tensão/comprimento. Os valores iniciais foram tomados de Figueiredo e Aquino (2005). Estes valores são os seguintes:

$$-k_n=40\text{MPa/m};$$

$$-k_s=4\text{MPa/m}.$$

O valor de  $k_s$  igual a 40MPa/m foi determinado pela expressão de Barton & Chooubey (1977) *apud* Figueiredo e Aquino(2005). Bandis *et.al* (1983) *apud* Figueiredo e Aquino (2005) sugeriram para tensões normais menores que 0,01MPa, valores de  $k_n$  iguais a 100 vezes o valor de  $k_s$ ; e para tensões normais maiores que 0,01MPa, valores de  $k_n$  iguais a 10 vezes o valor de  $k_s$ .

Os coeficientes das juntas foram alterados até que se obtivessem resultados mais satisfatórios (coerentes com o modelo), ou seja, até a obtenção do deslocamento horizontal observado na ruptura por flambagem. As propriedades de resistência e de deformabilidade para os maciços foram mantidas constantes.

Observou-se que o nível de tensão para o caso em estudo é maior que 0,01MPa para a tensão normal, portanto, ao final dessas análises obteve-se 18MPa/m para o coeficiente de rigidez normal ( $k_n$ ) e 1,8MPa/m para o coeficiente de rigidez cisalhante ( $k_s$ ).

Os deslocamentos determinados pelo modelo foram próximos ao observado no campo, na região da ruptura por flambagem. Pelo modelo observou-se um deslocamento horizontal de 0,27m e um deslocamento total de 0,32m.

O campo de vetores de deslocamento apresenta uma reorientação dos mesmos formando uma possível superfície por onde a ruptura ocorreria. Esta superfície possui uma parte plana e outra circular atingindo a rocha básica (Figura 39). Embora o exato mecanismo de ruptura e sua seqüência de ocorrência não sejam totalmente entendidos, supõe-se que em um primeiro momento ocorra ruptura planar ao longo da descontinuidade, seguida por ruptura da rocha intacta. Análises cinemáticas realizadas com os dados levantados pela empresa em nível de bancada evidenciam a cinemática para ocorrência de ruptura planar.

A superfície de ruptura encontrada na análise é relativamente próxima da superfície global de ruptura, mapeada em campo. Durante as análises com os ajustes feitos no modelo procurou-se adequar esta superfície à realidade de campo, para que se pudesse definir melhor os parâmetros de entrada do modelo.

A ruptura por flambagem foi verificada como sendo um modo de ruptura local, na área em estudo, ocorrendo em nível de bancada (altura de 6m e berma de 3m), havendo separação das placas rochosas, como pode ser observado pela Figura 40. Ainda no que diz respeito a esta ruptura, verifica-se pela Figura 41 uma alta concentração de pontos de tração na região em que ocorreu a ruptura. A abertura de fendas de tração no topo do talude, devido à reorientação do campo de tensões, gera uma concentração de tensões de tração no talude (Sjörberg, 1999).

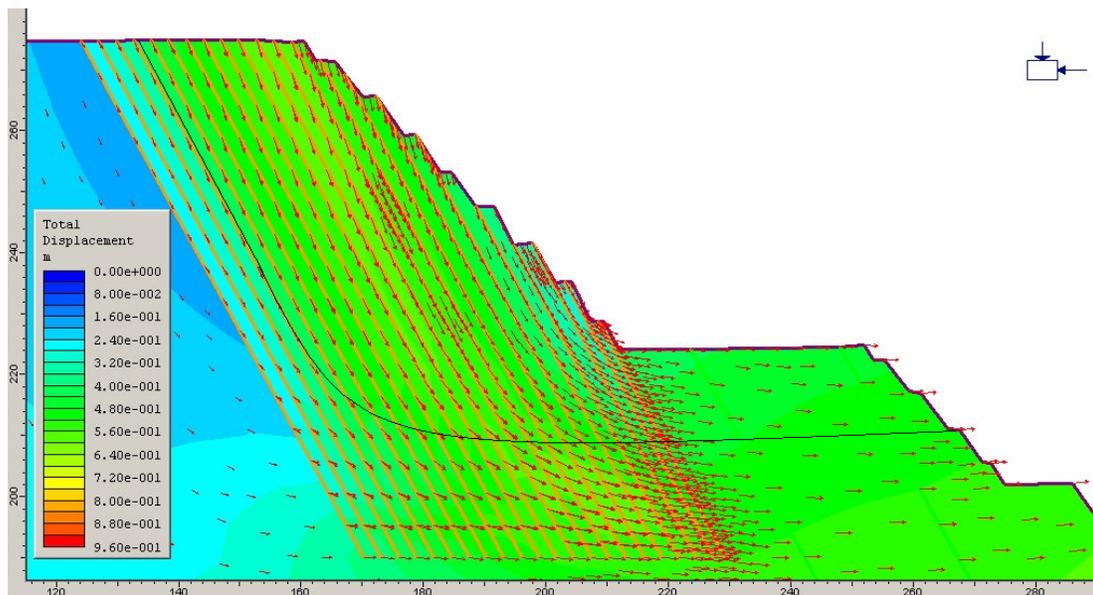


Figura 39- Possível superfície de ruptura

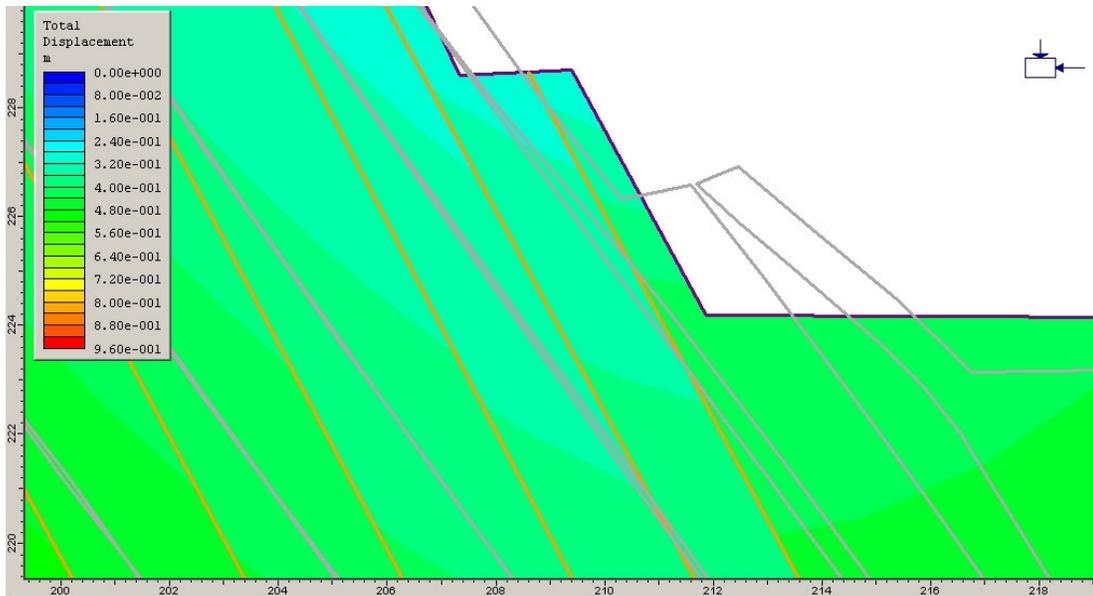


Figura 40- Ruptura por Flambagem

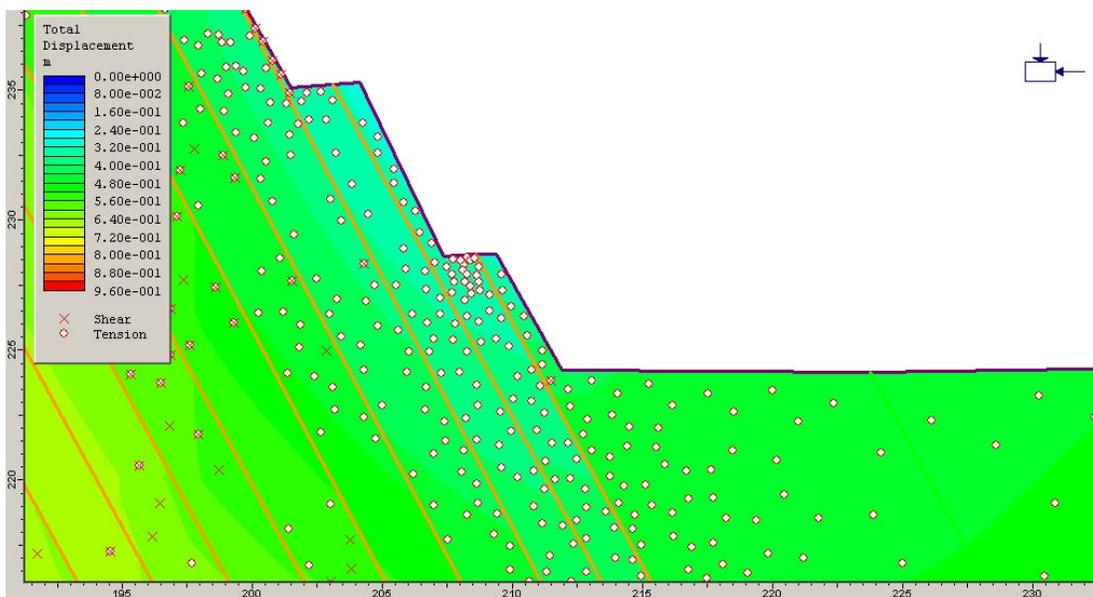


Figura 41-Região de Tracionamento

É importante frisar que se procurou neste trabalho utilizar determinadas formulações analíticas de equilíbrio-limite (Goodman, 1989; Adhikary *et.al* 2001), anteriormente citadas, para a análise da ruptura por flambagem. Entretanto, os resultados obtidos não foram coerentes. Diante disso, optou-se pela análise computacional para analisar a ruptura por flambagem na Cava Cachorro Bravo.

Neste trabalho verificou-se também a condição cinemática de deslizamento das lâminas para que a ruptura por flambagem ocorra. Para isto, efetuou-se uma ligeira modificação na condição proposta por Cruden (1989) *apud* Sjöberg (1999) para “Underdip Toppling”.

A condição para que a ruptura por flambagem ocorra pode ser formulada como:

$$\alpha \geq \phi_j - (90 - \varphi) \quad (18)$$

Onde:  $\alpha$  = ângulo do talude;

$\phi_j$  = ângulo de atrito da descontinuidade;

$\varphi$  = mergulho da descontinuidade.

No caso estudado verificou-se que a condição cinemática é satisfeita:

-  $\alpha = 61^\circ$ ;

-  $\phi_j = 33,7^\circ$ ;

-  $\varphi = 61^\circ$ .

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Por meio da realização da caracterização geotécnica e ensaio de alterabilidade buscou-se, gerar dados a respeito de rochas brandas no Quadrilátero Ferrífero, e também avaliar os fatores intempéricos influenciando no seu comportamento geotécnico. Além de uma avaliação qualitativa, também procurou-se analisar quantitativamente o processo de alteração em rochas brandas, diminuindo a subjetividade da análise.

Em termos de análise mineralógica procurou-se conciliar: a difração de raios-X (análise qualitativa), onde se identificou a caulinita como produto de alteração, o mais comum produto de alteração tropical, e a análise por meio da descrição de lâminas delgadas identificando de forma quantitativa os minerais presentes.

A variação nos índices físicos com o ensaio de alterabilidade: porosidade, índice de vazios (aumento) constitui importante indicador do processo de alteração sofrido pelas rochas e conseqüentemente influenciando na resistência do maciço rochoso. No entanto, a massa específica dos grãos mostrou-se bem próxima, o que é refletido na análise mineralógica, onde se verificou os mesmos constituintes mineralógicos para ambas as áreas estudadas. Salienta-se a dificuldade de realização dos ensaios, devido à fragmentação das amostras.

Os ensaios de alterabilidade acelerada (ciclagem água-estufa) foram importantes na compreensão dos processos intempéricos que ocorrem na natureza. Porém a análise quantitativa do efeito do processo de alteração sobre as rochas analisadas tornou-se prejudicado pelo baixo número de ciclos por elas experimentados, devido à desintegração rápida da maioria das amostras. Esta perda de grande parte das amostras também impossibilitou a realização dos ensaios de cisalhamento direto após o ensaio de alterabilidade, para as Cavas Crista e Cachorro Bravo.

A queda de coesão das amostras da Cava Cristina após o ensaio de alterabilidade mostra a importância do processo de alteração na redução da resistência ao cisalhamento da superfície de xistosidade.

Os fatores físicos foram dominantes nas amostras submetidas ao ensaio de alterabilidade. Certas mudanças no maciço rochoso, tais como; padrão de fraturamento, observado na ciclagem água-estufa pode levar o talude à condição de ruptura por meio do desenvolvimento e abertura de fraturas.

Determinadas estruturas, como superfícies de crenulação, podem contribuir no aumento da resistência como no caso da Cava Crista. Para esta área a envoltória de resistência por curva de potência mostrou-se mais adequada ao invés do modelo clássico bi-linear segundo o critério de Patton.

Observou-se um padrão distinto com relação às duas áreas estudadas, enquanto na Cava Crista verifica-se um maciço de boa resistência, na área da Cava Cachorro Bravo o maciço além de mais alterado que o da Cava Crista mostra-se mais susceptível a ruptura.

Em um primeiro momento, a análise da ruptura ocorrida na Cava Cachorro Bravo torna-se útil, pois permite a compreensão sobre o comportamento do maciço frente ao mecanismo de ruptura, por ora de forma preliminar, podendo servir de ponto de partida para estudos mais aprofundados sobre o mecanismo de ruptura em Cachorro Bravo e em outras áreas da mina que apresentem padrões semelhantes. Considera-se que o modelo de elementos finitos possa ser calibrado o suficiente para ser utilizado em uma análise de engenharia da situação da cava final em Cachorro Bravo.

A retro-análise permitiu, ainda, selecionar um conjunto de propriedades de resistência (pico e residuais) e de deformabilidade, bem como, o estado de tensões *in situ*, que reproduziram razoavelmente o mecanismo de ruptura ocorrido na Cava Cachorro Bravo (Julho/2003).

Alguns tópicos tornam-se interessantes para trabalhos futuros destacando-se:

- Uma nova série de ensaios de resistência a fim de aferir os valores obtidos e também para a Cava Carvoaria Velha, já que o maciço apresenta características semelhantes ao da Cava Cachorro Bravo.
- Realização de ensaios de alterabilidade com amostras menos alteradas a fim de reproduzir melhor o processo de alteração, e também ensaios de durabilidade.
- Realização de análises de estabilidade para diferentes condições geométricas do modelo estudado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABNT NBR 6508 (1984)- Graões que passam na # 4,8mm, Determinação da Massa Específica,8p.

ABNT NBR 12696 (1992). Agregados-Verificação do comportamento mediante ciclagem artificial água-estufa, 3p.

ADHIKARY, D.P., MÜHLHAUS, H.B., DYSKIN, A.V. (2001). A numerical study of flexural buckling of foliated rock slope. International journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 25. 871-884p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. (1998).Geologia de Engenharia. ABGE/FAPESP/CNPq. São Paulo. 576 p.

AZEVEDO, I.C.D. e MARQUES, E.A. G (2002). Introdução à Mecânica das Rochas, Ed. UFV. 361 p

BELL, F.G., ENTWISLE, D.C., CULSHAW, M.G. (1997). A geotechnical survey of some British Coal Measures mudstones, with particular emphasis on durability. Engineering Geology. 46. 115-129p.

BIENIAWSKI, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classification: Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering. John Wiley & Sons. New York, 251p.

BRADY, B.H.G & BROWN, E.T. (1985). Rock Mechanics for Underground Mining. Allen & Unwin. London, 527p.

CANTÓN, Y., BENET, A.S., QUERALT, I., PINI, R. (2001). Weathering of a gypsum-calcareous mudstone under semi-arid environment at Tabernas, SE Spain: laboratory and field-based experimental approaches. *Catena*. 44. 111-132p.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO-CESP (1990) MRL -02-Ensaio de alteração em rochas – Ciclagem água-estufa. Laboratório Central de Engenharia Civil/CESP. 10 p.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO-CESP (1990) MCA-12-Sanidade dos agregados através de imersão no etileno-glicol. Laboratório Central de Engenharia Civil/CESP. 7 p.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SÃO PAULO-CESP (1990) MRL-03-Ensaio de alteração de rochas-Lixiviação em Extrator Soxhlet. Laboratório Central de Engenharia Civil/CESP. 12p.

CHIGIRA, M., OYAMA, T. (1999). Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. *Engineering Geology*. 55. 3-14p.

COSTA, J.I. (2002). Caracterização Mineralógica e Tecnológica de uma jazida de Serpentinó Dissertação de Mestrado. UFOP. Ouro Preto, MG 102 p.

DUPERRET, A., TAIBI, S., MORTIMORE, R.N., DAIGNEAULT, M. (2005). Effect of groundwater and sea weathering cycles on the strength of chalk rock from unstable coastal cliffs of NW France. *Engineering Geology*. 78. 321-343p.

ESPADA, E. (2003). Geological and structural mapping of the Córrego do Sítio Archean Lode Goldmine District, Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. 76p. Relatório Interno.

EVANGELISTA, H.J. (1988). Petrologia Ígnea e Metamórfica-Minerais Petrográficos de Rochas Ígneas e Metamórficas; Resumo de Propriedades Óticas e Ocorrência. UFOP. Ouro Preto, 150p.

EVANGELISTA, H.J. (1999). Microestruturas de Rochas Metamórficas. UFOP. Ouro Preto, 31p.

FERNANDES, G. (2000). Caracterização Geológico-Geotécnica e Proposta de Estabilização da Encosta do Morro do Curral. Centro de Artes e Convenções de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG.136 p.

FERREIRA, S. B. (2004). Estudo de Ruptura em Talude Urbano no Morro do Curral-Ouro Preto/MG. Dissertação de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, MG. 87 p.

FIGUEIREDO, R.P., LANA, M.S. (1999). Análise da Estabilidade do Talude Final na Mina de Timbopeba. Revista da Escola de Minas (REM). Ano 63,v.52,n 4. 239-244p.

FIGUEIREDO, R.P., AQUINO, T.V.C. (2005). Caracterização e Retro-análise Preliminar do Mecanismo de Tombamento Flexural-Mina do Pico/MBR. Anais do 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Florianópolis. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 2274-2290p.

FIORI, P.A.,CARMIGNANI. (2001).Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas- Aplicações na estabilidade de Taludes.Ed. UFPR.550 p.

FOOKES, P.G., GOURLEY, C.S., OHIKERE, C. (1988). Rock weathering in engineering time. Quartely Journal of Engineering Geology. 21. 33-57 p.

FRANKLIN, J.A & DUSSEAULT, M.B. (1989). Rock Engineering. Mcgraw-Hill. 600p.

GIANI, G.P. (1992). Rock Slope Stability Analysis. A. A. Balkema, 361p.

GÖKÇEOĞLU, C., ULUSAY, R., SÖNMEZ, H. (2000). Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. Engineering Geology. 57. 215-237p.

- GOODMAN, R.E. (1989). Introduction to Rock Mechanics. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons. New York. 562p.
- GOODMAN, R.E. (1993). Engineering Geology: Rock in Engineering Construction. John Wiley. New York, 412p.
- GUPTA, A.S., SESHAGIRI RAO, K. (1998). Index properties of weathered rocks: inter-relationships and applicability. Bulletin Engineering Geological Environment. 57. 161-172p.
- GUIDICINI, G., NIEBLE, C.M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavações . Editora Edgard Blücher Ltda, 2<sup>a</sup> ed. São Paulo, 195 p.
- HEAD, K.A. (1986). Manual of Soil Laboratory Testing. Pentech Press, v.2 London, 442p.
- HOEK, E & BRAY, J.W. (1981). Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy. 3ed. London, 358p.
- HOEK, E., KAISER, P.K., BAWDEN, W.F. (1995). Support of underground excavation in hard rock. A.A. Balkema. Rotterdam. 215p.
- HOEK, E., BROWN, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal Rock Mechanics Mining Sciences. 34. 1165-1186p.
- HOEK, E. (2001). Rock Engineering-Courses Notes. Vancouver. 313p.
- HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C., CORKUM, B. (2002). Hoek-Brown Failure Criterion-2002.
- HUDEK, P.P. (1997). Changes in Engineering Properties of Weak and Weathered Rock with Time. Characterization of Weak and Weathered Rock Masses. Association of Engineering Geologists- Annual Meeting, Portland. 53-72p.

HUDSON, J.A & HARRISON, J.P. (1997). Engineering rock Mechanics: an introduction to the principles. Pergamon. Oxford, 444p.

HUNT, R.E. (1984). Geotechnical Engineering Investigation Manual. McGraw-Hill, USA.983 p.

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

JAEGER, J.C & COOK, N.G.W. (1979). Fundamentals of Rock Mechanics. 3ed. Chapman and Hall. London, 593p.

JING, L., HUDSON, J.A. (2002). Numerical methods in rock mechanics. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 39. 409-427p.

JING, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. International Journal of Rock Mechanics & mining Sciences. 40. 283-353p.

JOHNSON, R.B., DEGRAFF, J.V (1988). Principles of Engineering Geology. Ed. John Willey & Sons. 497 p.

KAZAKIDIS, V.N. (2002). Confinement Effects and Energy Balance Analyses for Buckling Failure Under Eccentric Loading Conditions. Rock Mechanics and Rock Engineering. 35. 115-126p.

LADEIRA, F, L (1983). Ensaio em Mecânica das Rochas, UFOP. Ouro Preto, 150 p.

LANA, M.S., GRIPP, M.F. (1999). Um procedimento para identificação dos mecanismos de ruptura em taludes rochosos. Revista da Escola de Minas (REM), Ano63. v.52.n 4.245-249p.

LANA, M.S. (2000). Estudo dos Mecanismos de Ruptura em Taludes de Grande altura em um Maciço Rochosos de Geologia Estrutural Complexa. Tese de Doutorado. UFMG. Belo Horizonte. 211p.

LEITE, E.N. (2004). Estudo do comportamento Geomecânico do Pilar Superior da Mina IpueiraV (Ferbasa Mineração- Andorinha,BA). Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG, 81p.

LOPES, R.L. (2000). Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos: Mina São Bento. Dissertação de Mestrado. UFV. Viçosa, MG. 149 p.

MACIEL FILHO, C.L. (1997). Introdução à Geologia de Engenharia. Editora UFSM, Santa Maria-RS; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Brasília-DF. 284 p.

MARQUES, E.A.G., VARGAS, E.A, ANTUNES, F. (2004).A study of the durability of some shales, mudrocks and siltstones from Brazil.Technical Note. Geotechnical and Geological Engineering. 1-28 p.

MARQUES. E.A.G., VARGAS, E, A. (1994). Weatherability and alteration studies of some shales and siltstones from the Recôncavo sedimentary basin. 7<sup>th</sup> International IAEG Congress. 729-738p.

OJIMA,L.M (1982). Metodologia de Classificação de Maciços Rochosos Aplicável a Túneis. Síntese da tese apresentada ao concurso para especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa, 100 p.

PINHEIRO, A.L. (2002). Análise de rupturas em Taludes no morro do Curral, Ouro Preto, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG, 116p.

REIS,E.C (2005). Dimensionamento de Malhas de Furação para Desmonte de Rochas com Argamassa Expansiva por Mecânica de Fratura. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, MG, 117p.

ROCSCIENCE. Phase<sup>2</sup> Tutorials. [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).

SADISUN, A., SHIMADA, H., ICHINOSE, M., MATSUI, K. (2005). Study on the physical desintegration characteristics of Subang claystone subjected to a modified slaking index test. *Geotechnical and Geological Engineering*. 23. 199-218p.

SCARPELLI, A.G. (1994). Classificação Geomecânica Aplicada à Avaliação da Estabilidade de Taludes em Minas de Ferro do Quadrilátero Ferrífero. Dissertação de Mestrado. EESC-USP, SP. 187p.

SEIJMONSBERGEN, A.C., WONING, M.P., VERHOEF, P.N.W., DE GRAFF, L.W.S. (2005). The failure mechanism of a Late Glacial Sturzstrom in the Subalpine Molasse (Leckner Valley, Voralberg, Austria). *Geomorphology*. 66. 277-286p.

SJÖRBERG, J. (1999). Analysis of large scale rock slopes. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Lulea, Sweden.

STEAD, D., EBERHARDT, E. (1997). Development in the analysis of footwall slopes in surface coal mining. *Engineering Geology*. 46. 41-61p.

TANGCHAWAL, S. (1990). Effects of moisture and mineralogy on swelling and strength reduction. 6<sup>th</sup> International IAEG Congress. 1243-1247 p.

TAYLOR, R.K., SMITH, T.J. (1986). The engineering geology of clay minerals: swelling, shrinking and mudrock breakdown. *Clay Minerals*. 21. 235-260 p.

VAZ, L.F. (1996). Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais. *Solos e Rochas*. v.19.nº2 117-136p.

WATTERS, R.J. (1997). The Effects of Weathering on Rock Masses. Characterization of Weak and Weathered Rock Masses. Association of Engineering Geologists- Annual Meeting, Portland. 37-52p.

YOKOTA, S., IWAMATSU, A. (1999). Weathering distribution in a steep slope of soft pyroclastic rocks as an indicator of slope instability. Engineering Geology. 55. 57-68p.

# ANEXO I

## **ANÁLISE MINERALÓGICA**

## MICROSCOPIA ÓPTICA

De acordo com Evangelista (1988) e Evangelista (1999), segue-se a descrição das lâminas com nome e quantidade de cada mineral encontrado por observação em microscópico óptico.

### **Lâmina-Cava Crista (Fig A1. 1)** *Filito Milonitizado*

Descrição dos minerais e percentagem estimada visualmente:

- **Quartzo (40%):** Incolor e com extinção ondulante. Ocorre em porfiroblastos com habito granular xenoblástico e também alongado segundo a foliação milonítica.
- **Sericita (29%):** Apresenta-se em agregados fibrosos de finíssima granulação e orientação preferencial planar, caracterizando a pronunciada foliação.
- **Limonita(30%):** Tabular e também se orienta segundo a foliação além de se apresentar bastante oxidada.
- **Muscovita (1%):** Esta ocorre em pequena quantidade, com hábito tabular, incolor.
- **Clorita (traço):** Ocorre em pequenos cristais com hábito tabular. Sua identificação e quantificação se tornam bastante difícil diante do estado de oxidação da limonita.



Figura. A1. 1- Clivagem de Crenulação (Cava Crista)

**Lâmina - Cava Cachorro Bravo (Fig A1. 2)**

***Filito Milonitizado***

Descrição dos minerais e percentagem estimada visualmente:

- **Quartzo (45%):** Incolor e com extinção ondulante. Ocorre com habito granular xenoblástico e também alongado segundo a foliação milonítica.
- **Sericita(25%):** Apresenta-se em agregados fibrosos de finíssima granulação e orientação preferencial planar, caracterizando a pronunciada foliação.
- **Limonita (25%):** Tabular e se orienta segundo a foliação além de se apresentar bastante oxidada.
- **Muscovita (5%):** Ocorre em pequena quantidade, com hábito tabular, incolor.
- **Clorita (traço):** Ocorre em pequenos cristais com hábito tabular.

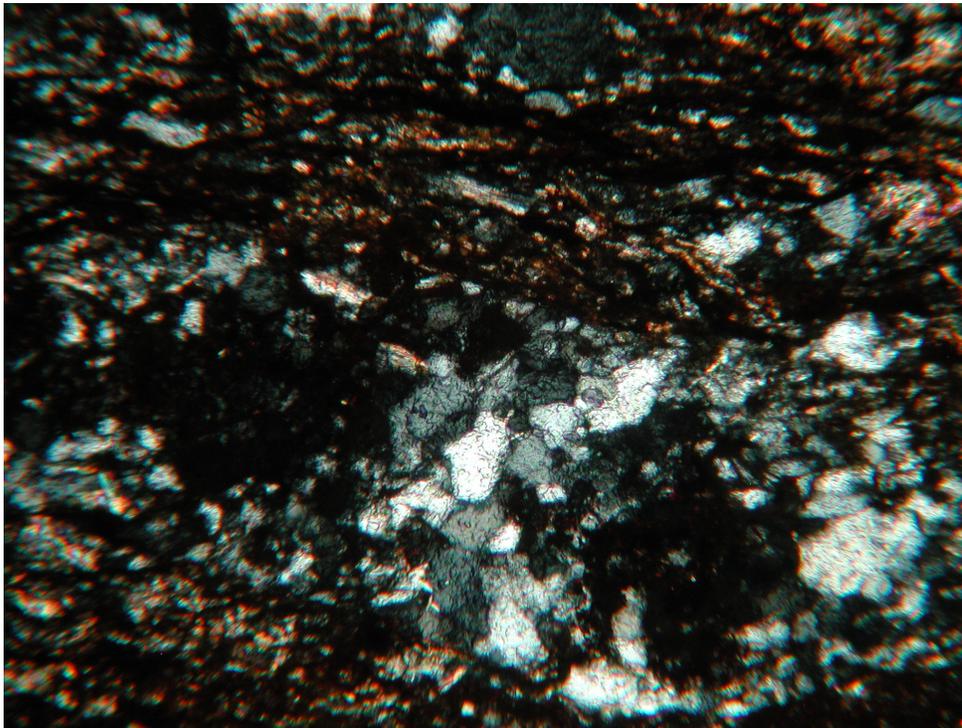


Figura. A1. 2- - Sub-grãos de quartzo (Cava Cachorro Bravo)

**Lâmina - Cava Cristina (Fig A1. 3)**

***Filito Milonitizado***

Descrição dos minerais e percentagem estimada visualmente:

- **Quartzo (50%):** Incolor com extinção ondulante. Ocorre em cristais com hábito granular, granoblástica e também alongado segundo a foliação.
- 
- **Sericita(24%):** Apresenta-se em agregados fibrosos de finíssima granulação e orientação preferencial planar, caracterizando a pronunciada foliação.
- **Limonita (25%):** Tabular e se orienta segundo a foliação além de se apresentar bastante oxidada.
- **Muscovita (1%):** Ocorre em pequena quantidade, com hábito tabular, incolor.
- **Clorita (traço):** Ocorre em pequenos cristais com hábito tabular.

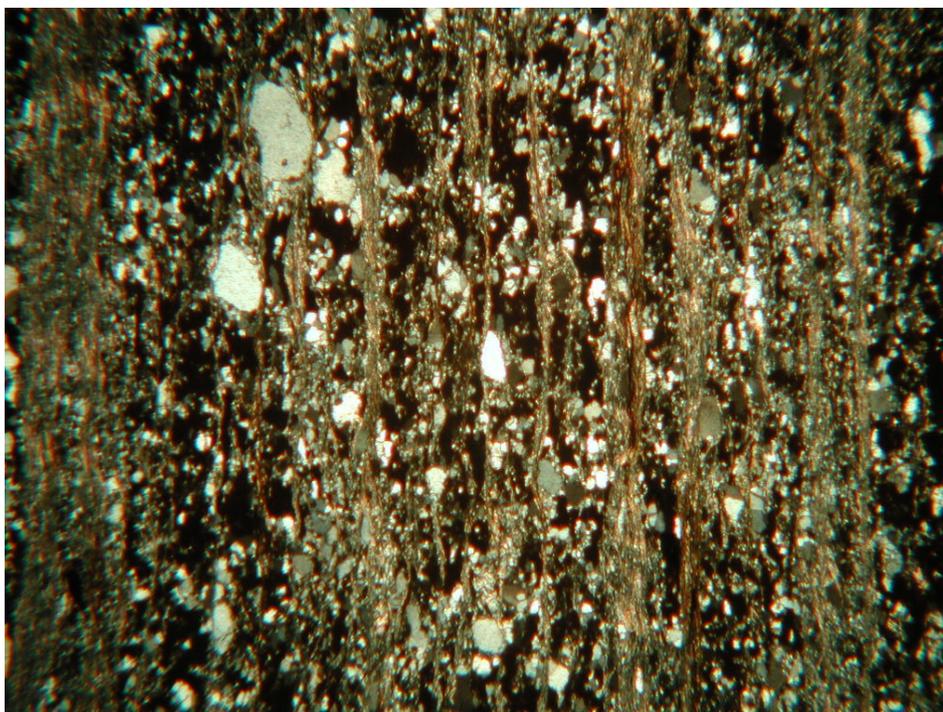


Figura. A1. 3- Bandamento resultante da variação da proporção de quartzo e mica (Cava Cristina)

## DIFRATOMETRIA DE RX

Abaixo as **Fig A1.4** a **A1.6** mostram a ocorrência dos minerais, identificados na difração de raio-X, de forma qualitativa, apontando aqueles que aparecem mais.

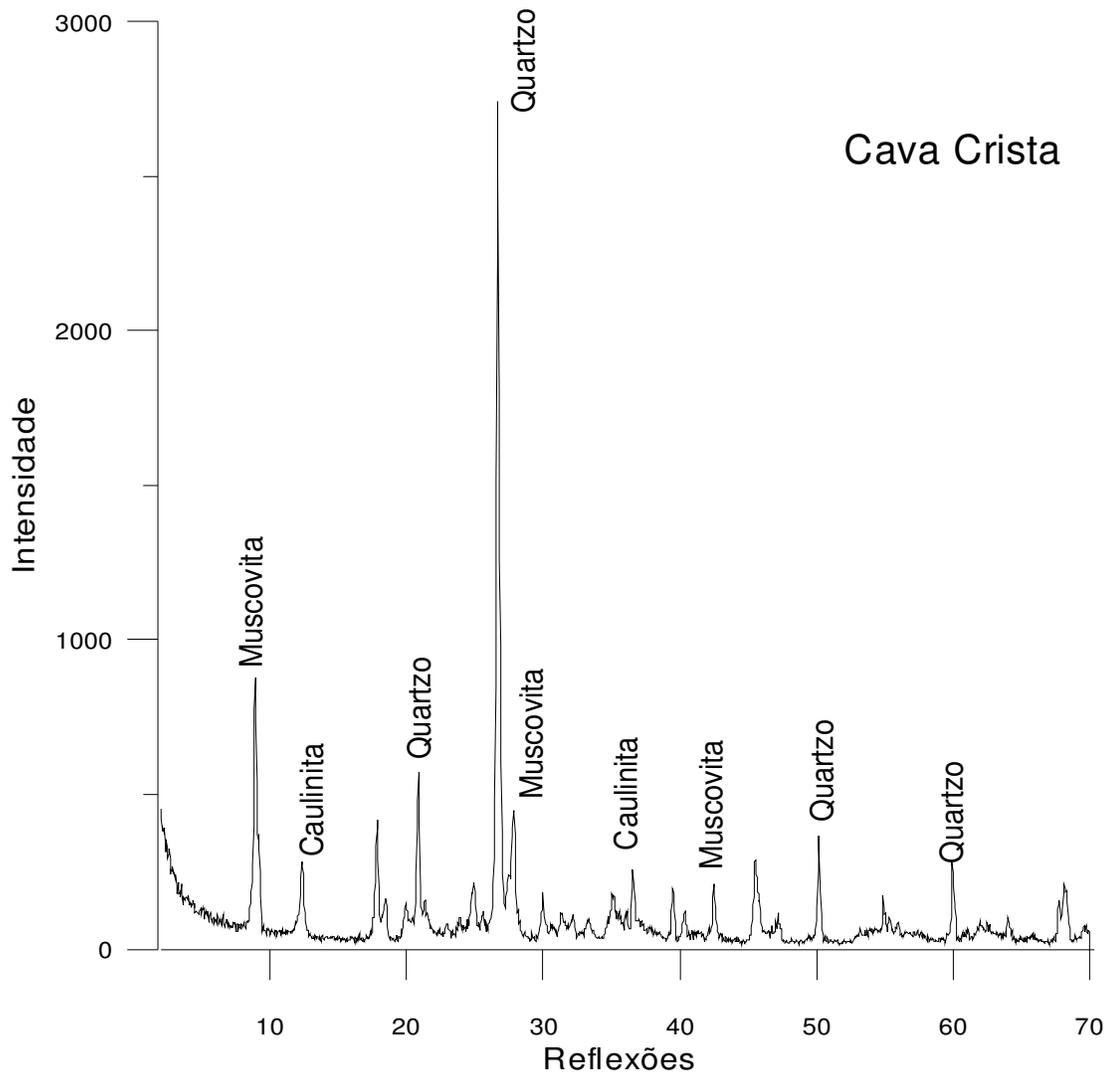


Fig.A1. 4: Difratograma da Cava Crista

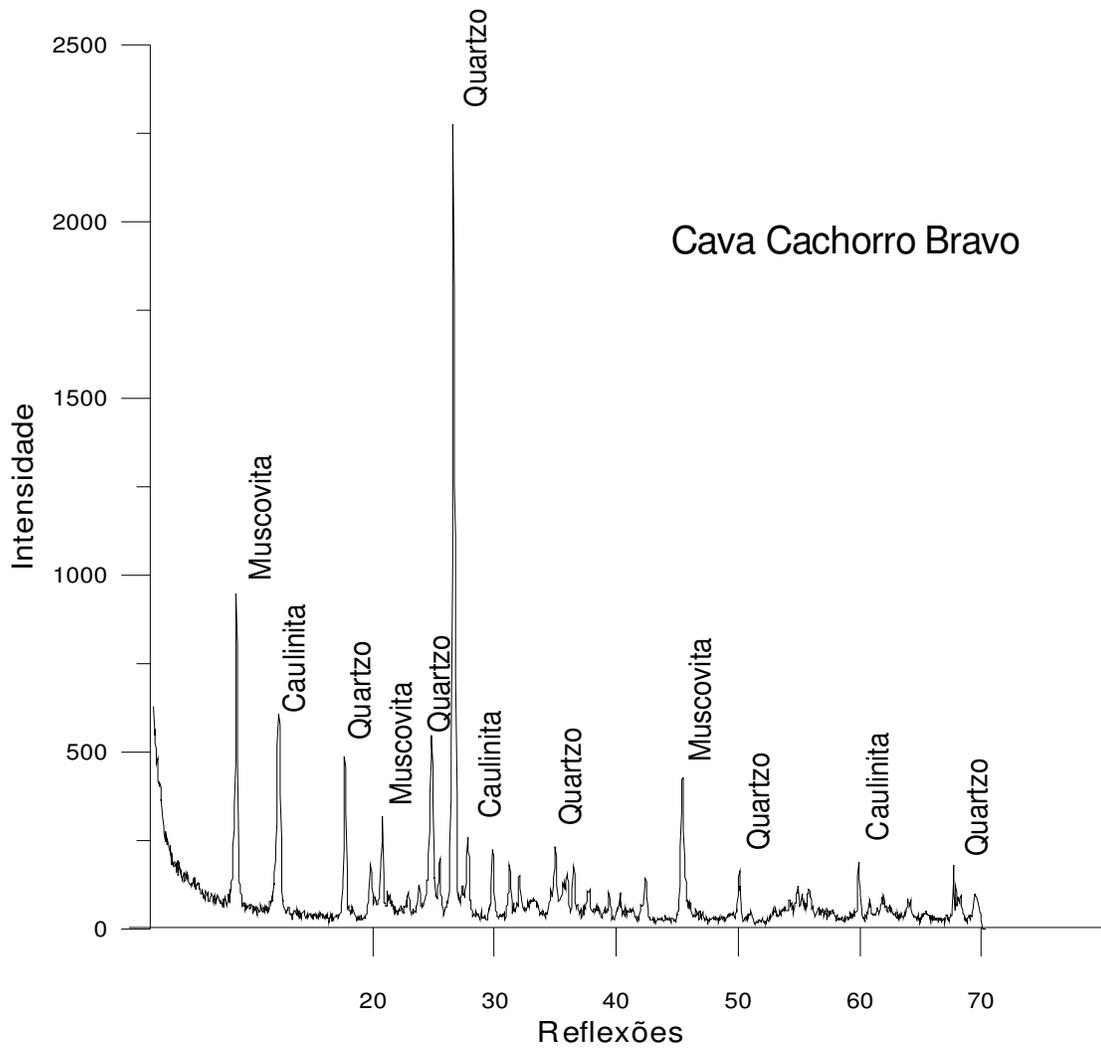


Fig.A1. 5: Difratoograma da Cava Cachorro Bravo

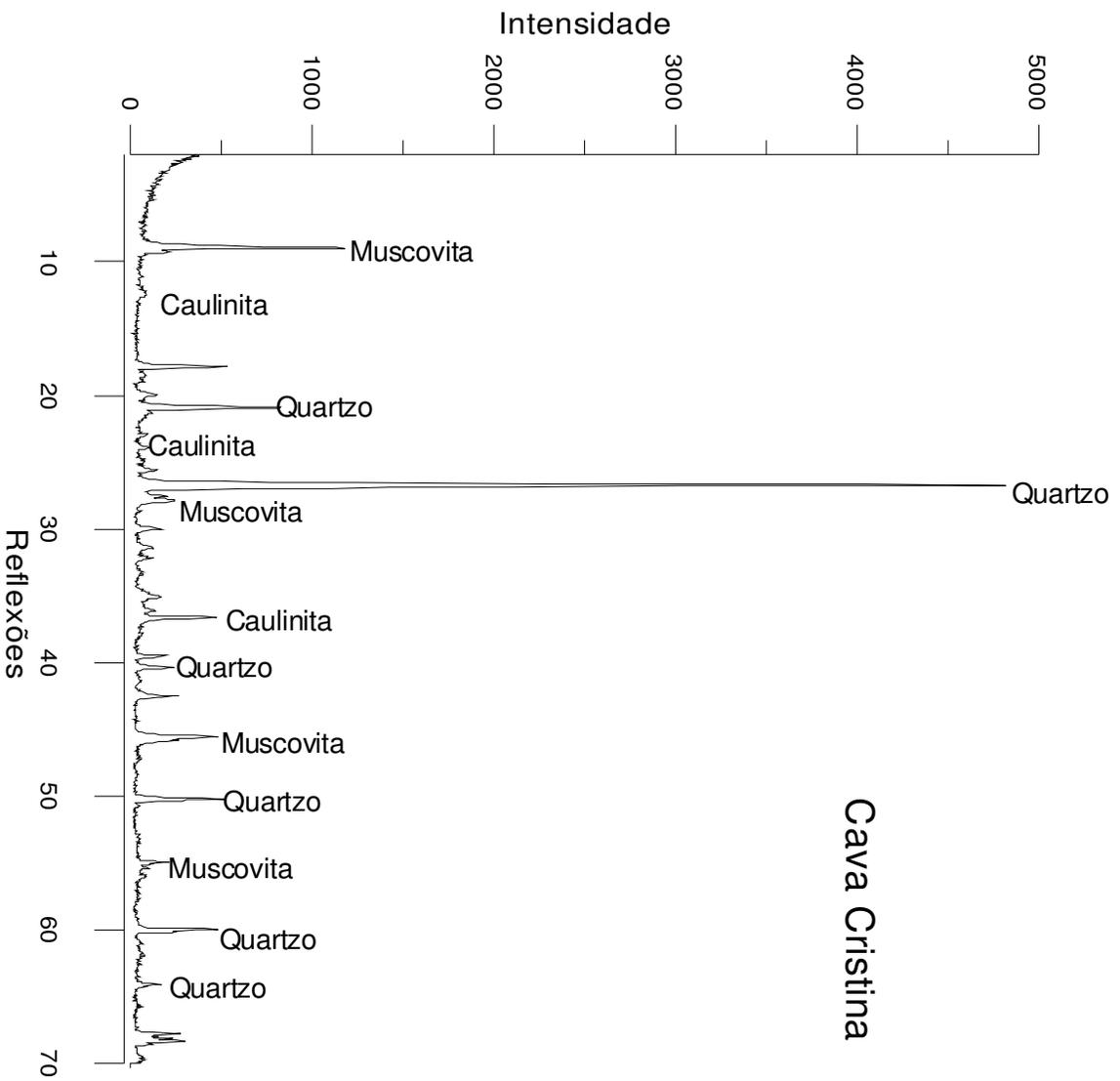


Fig.A1. 6: Difratograma da Cava Cristina

Cava Cristina

## ANEXO II

### **ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO**

# CAVA CRISTA

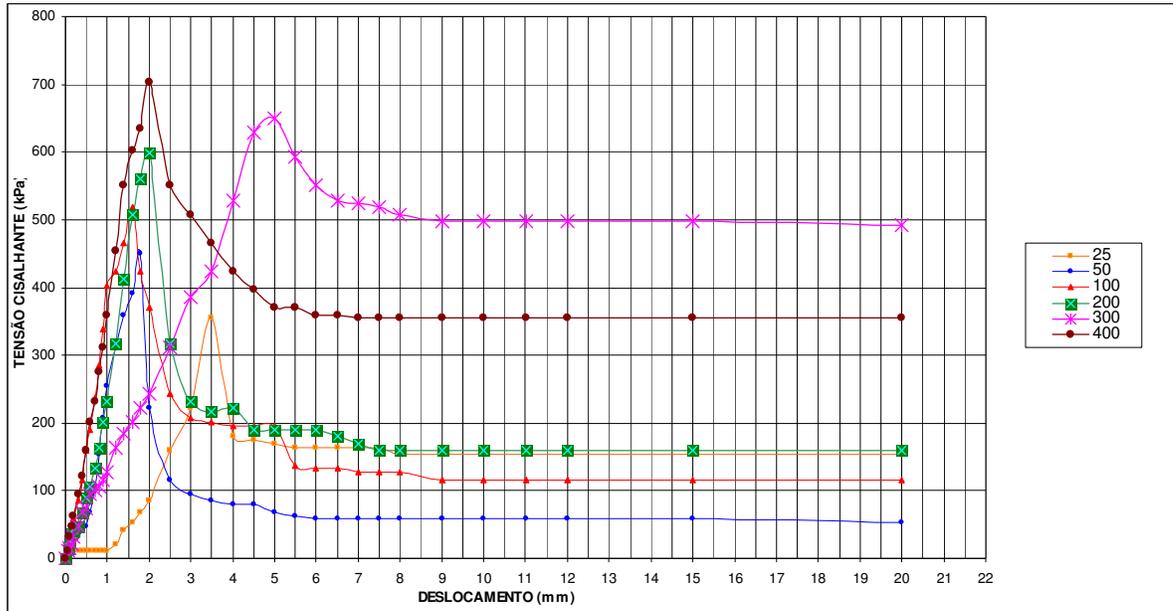


Figura. A2. 1- Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal

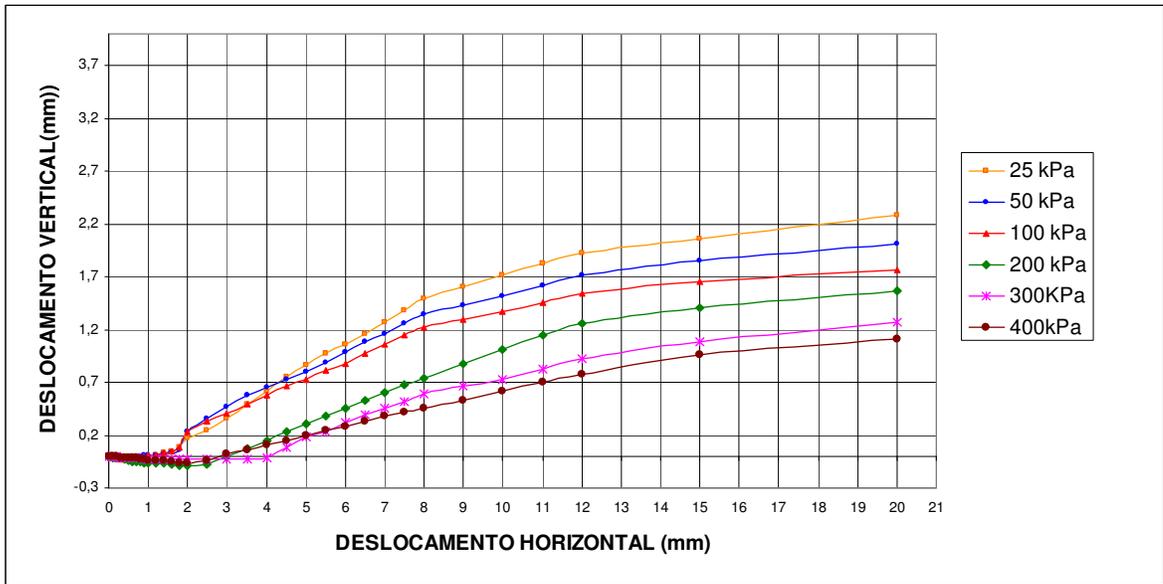


Figura. A2. 2- Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal

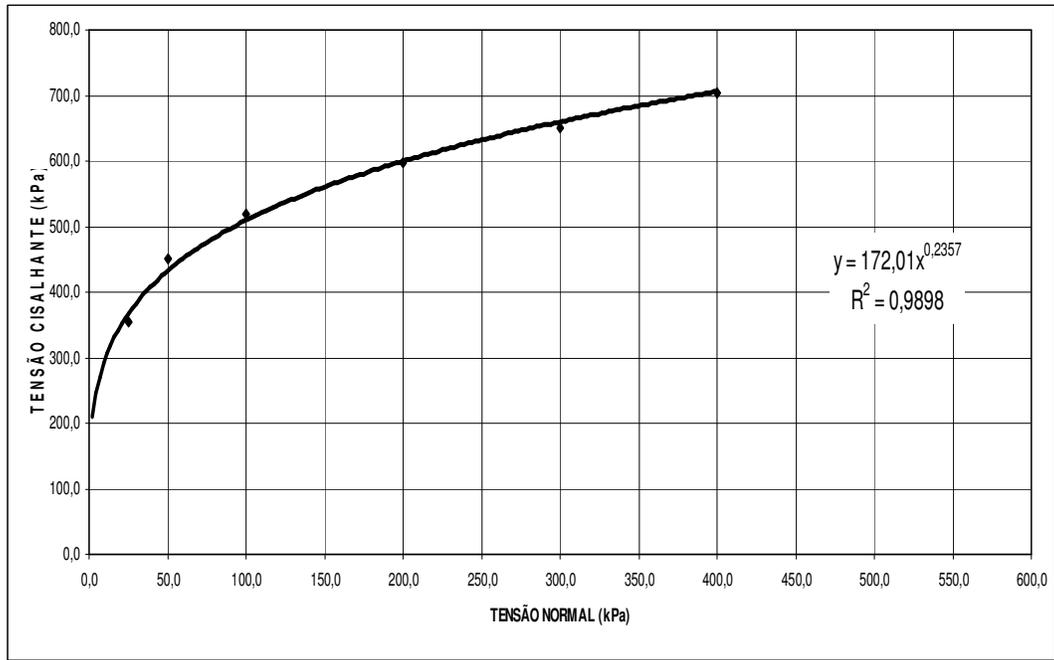


Figura. A2. 3- Envoltória de Resistência

# CAVA CACHORRO BRAVO

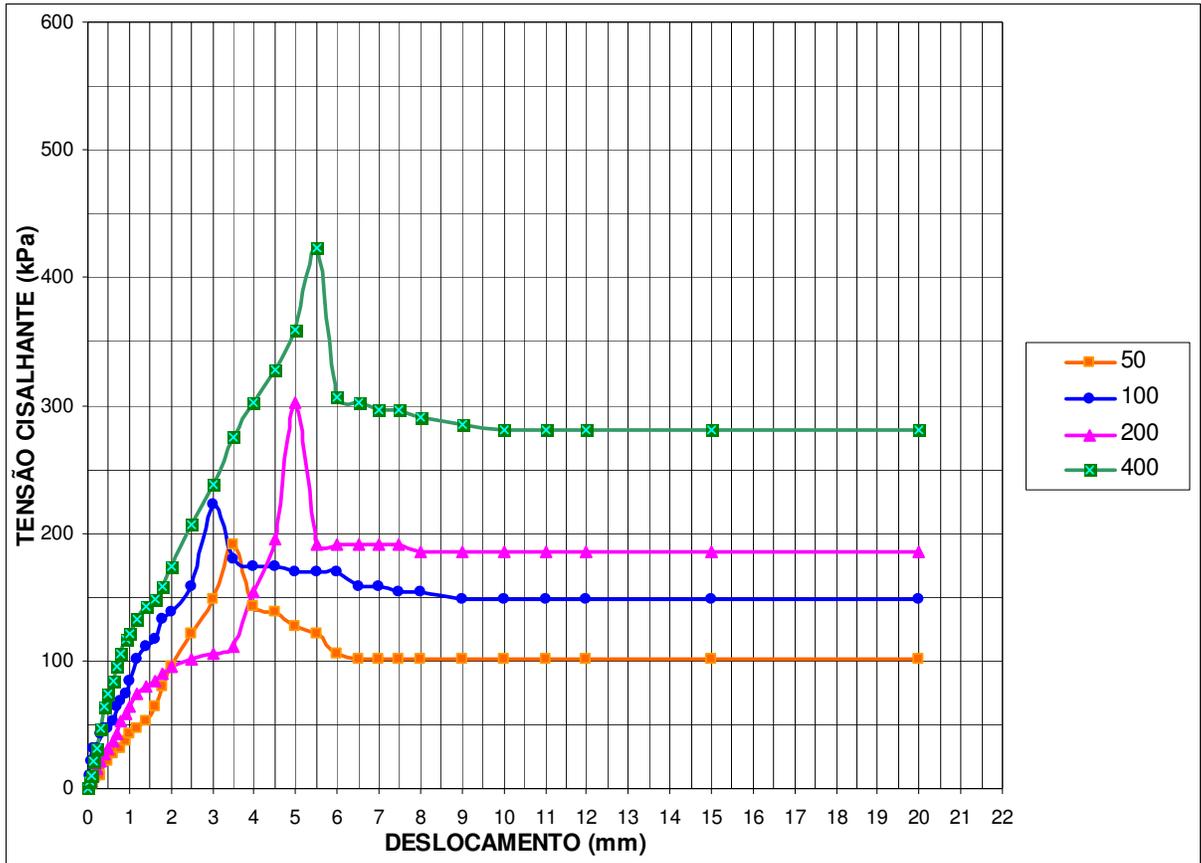


Figura. A2. 4- Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal

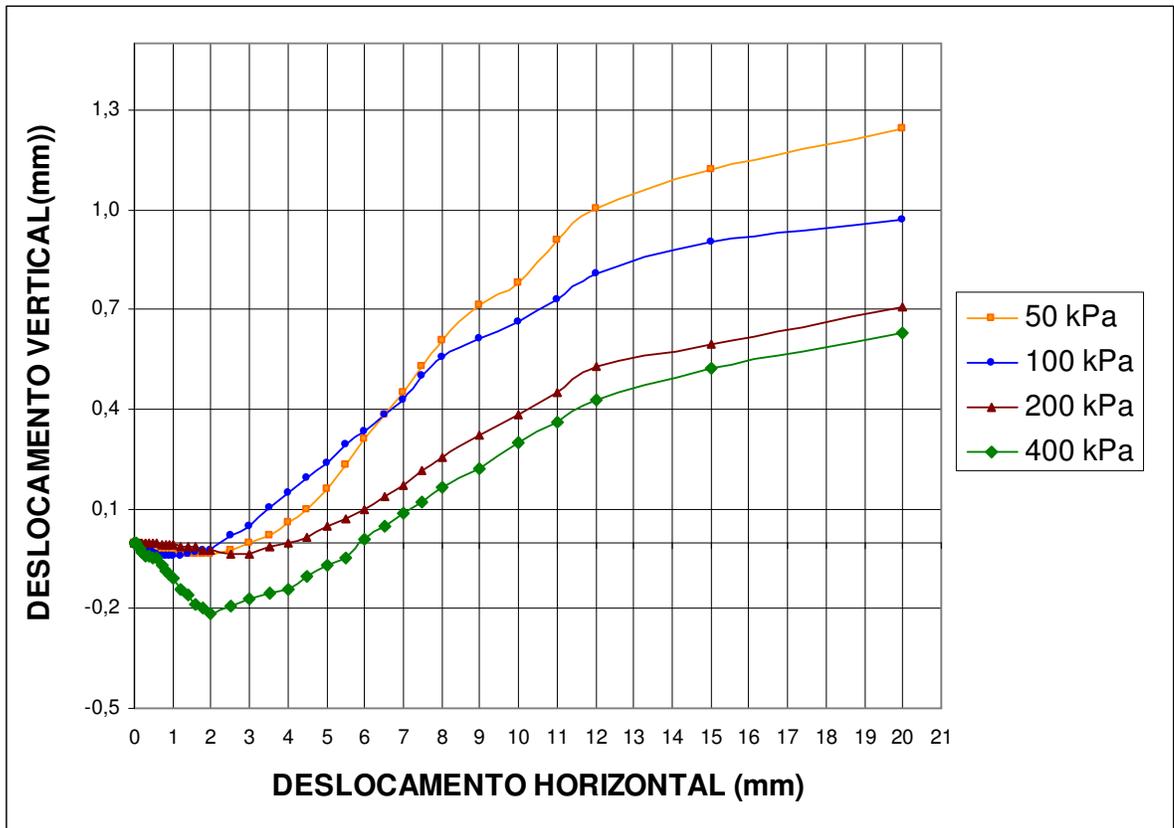


Figura. A2. 5- Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal

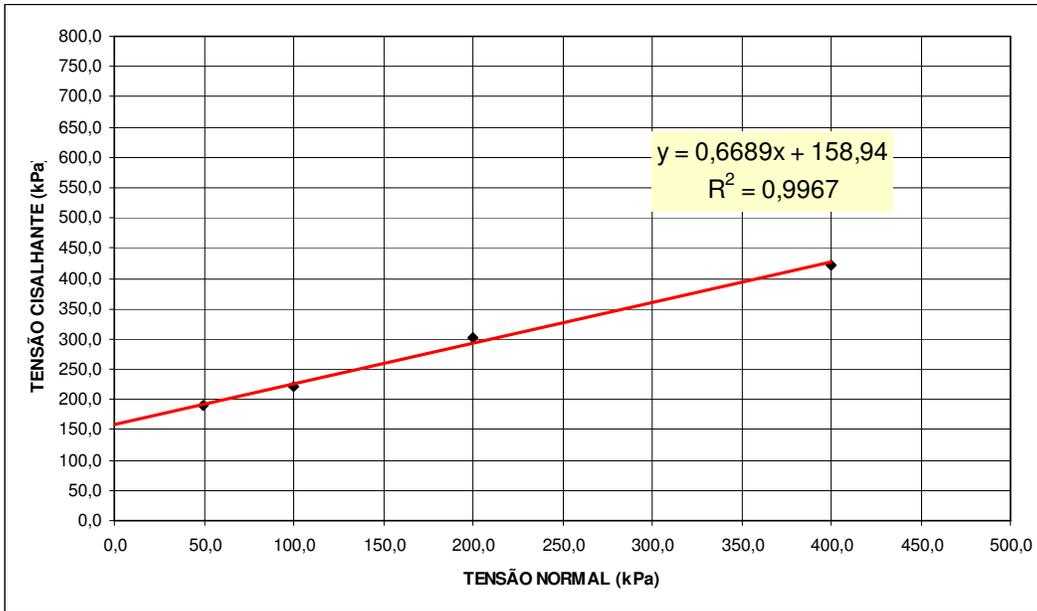


Figura. A2. 6- Envoltória de Resistência

# CAVA CRISTINA

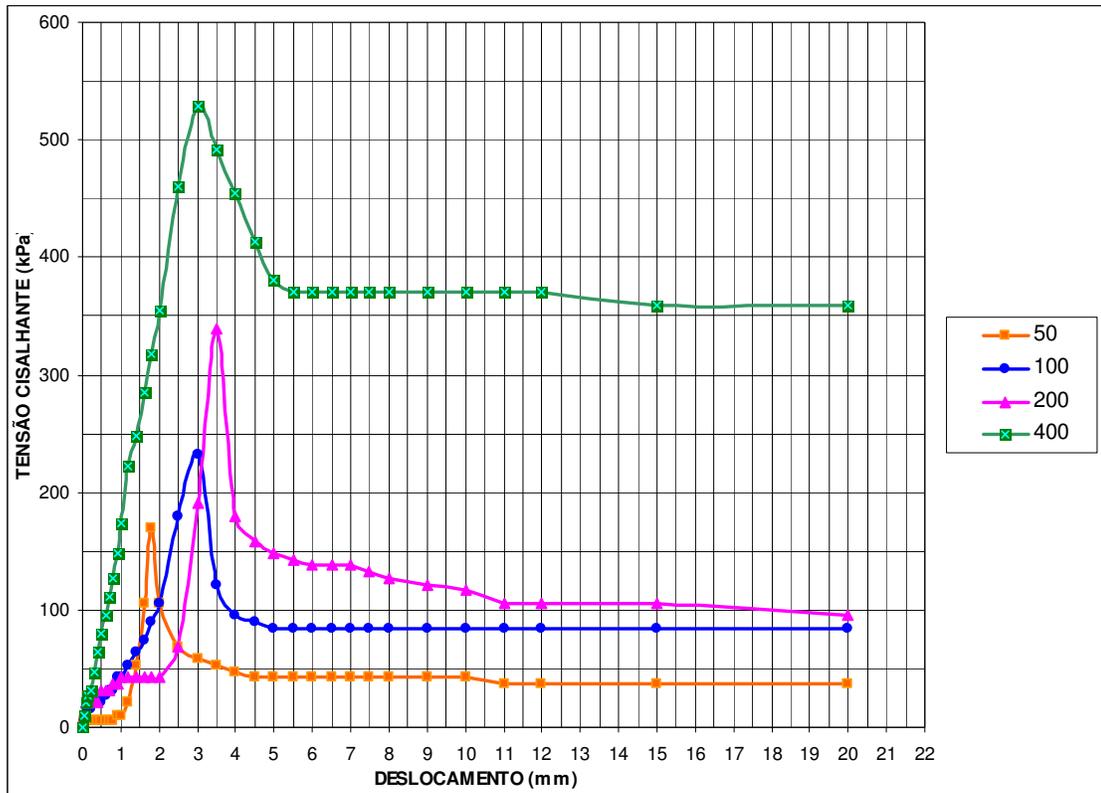


Figura. A2. 7- Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal

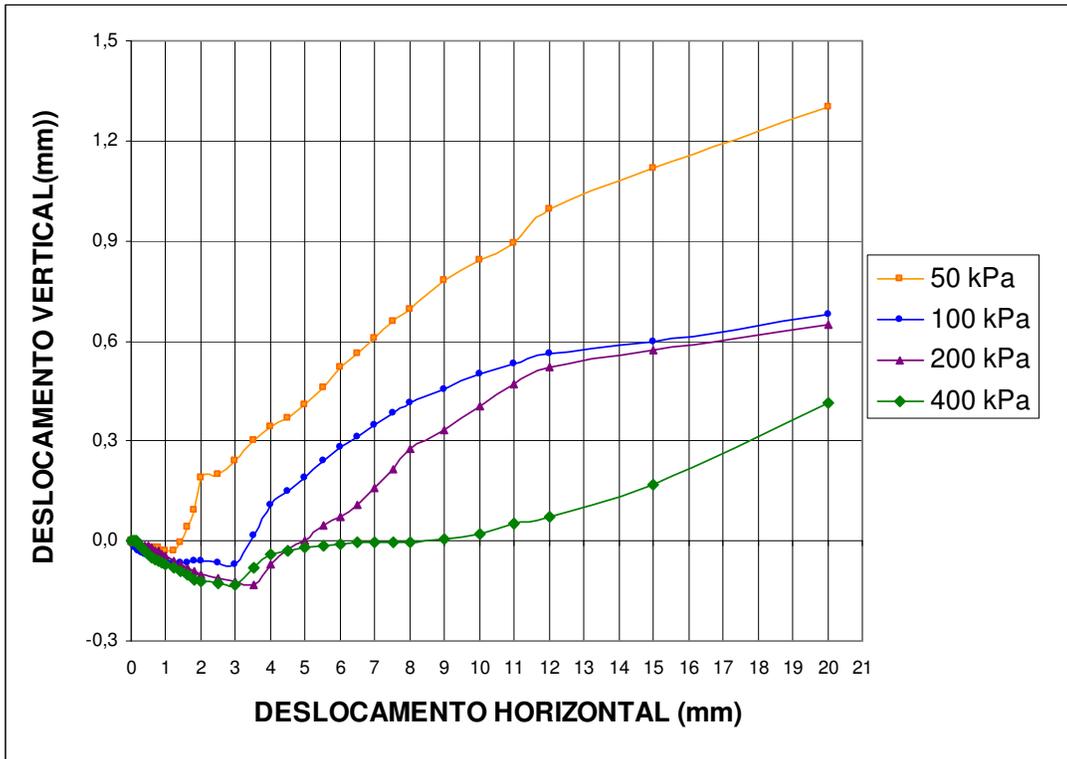


Figura. A2. 8- Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal

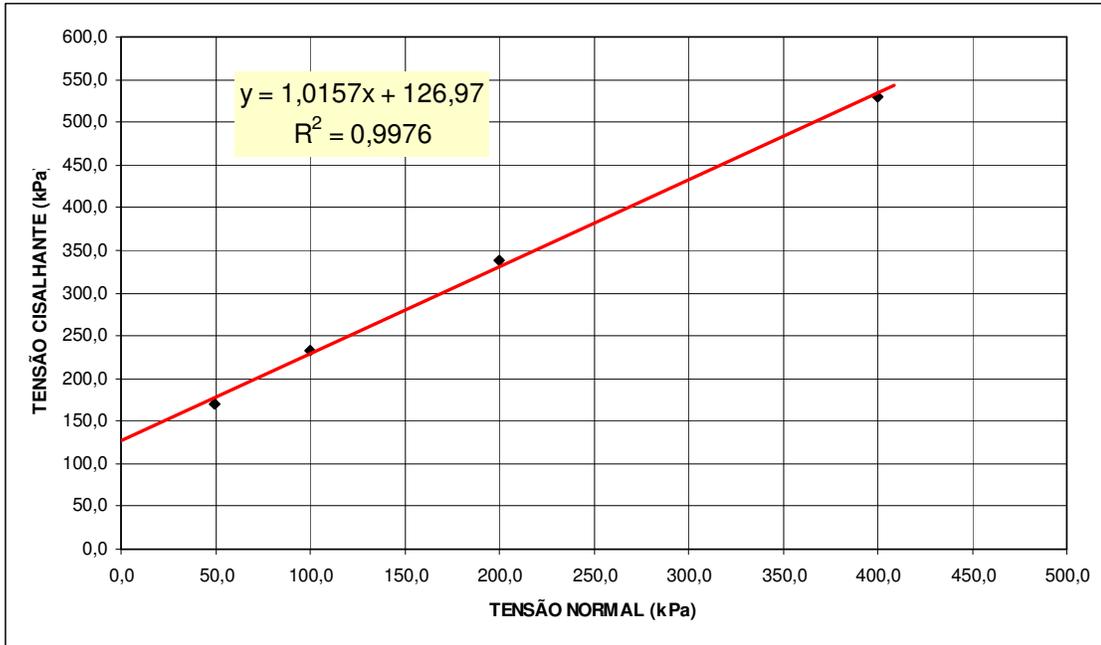


Figura. A2. 9- Envoltória de Resistência

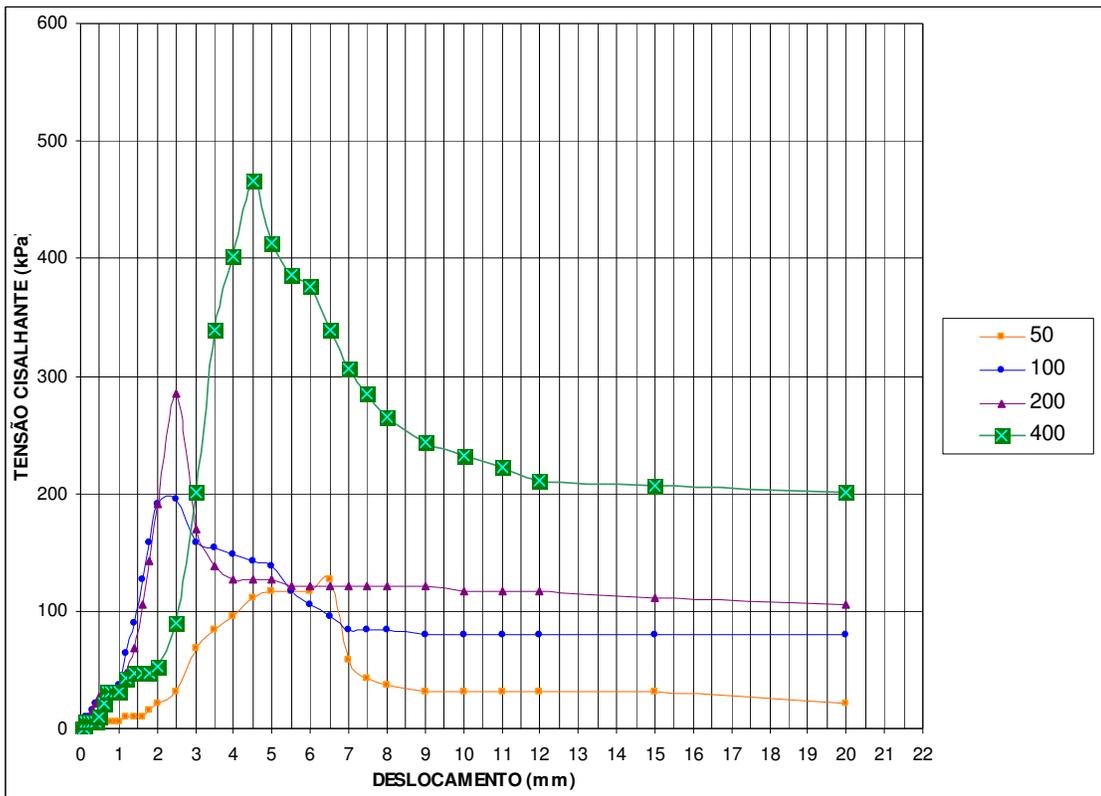


Figura. A2. 10- Curva Tensão Cisalhante x Deslocamento Horizontal (após ensaio de alterabilidade)

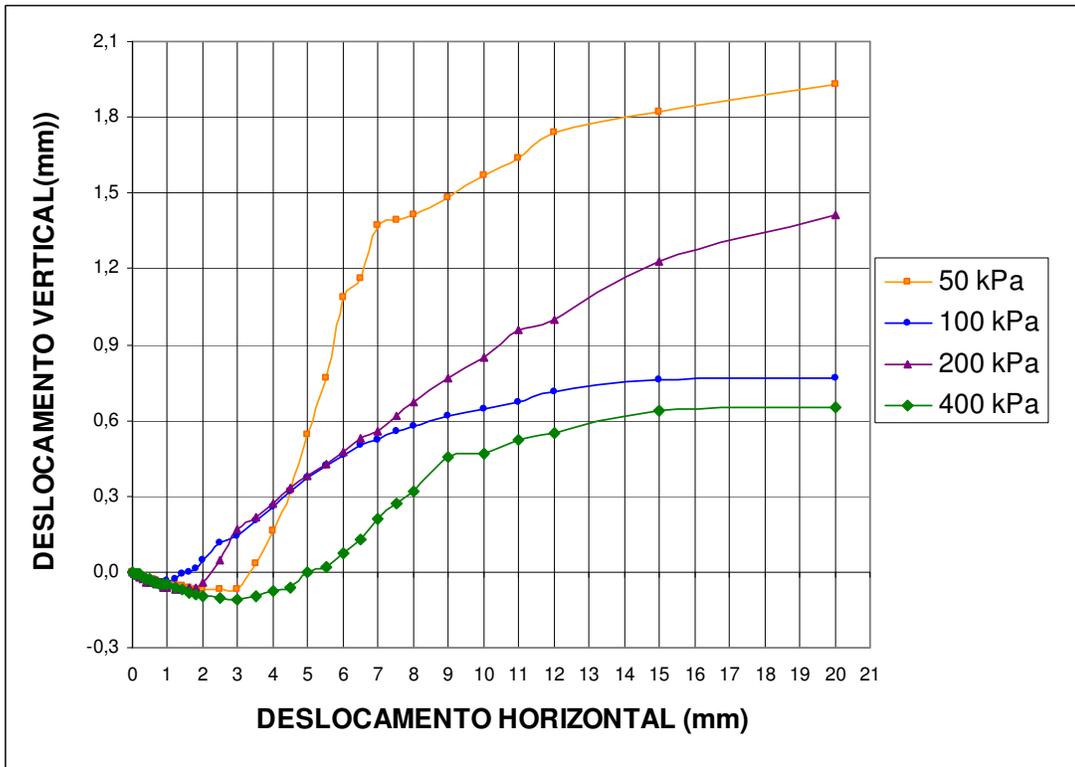


Figura. A2. 11- Deslocamento Vertical x Deslocamento Horizontal (após ensaio de alterabilidade)

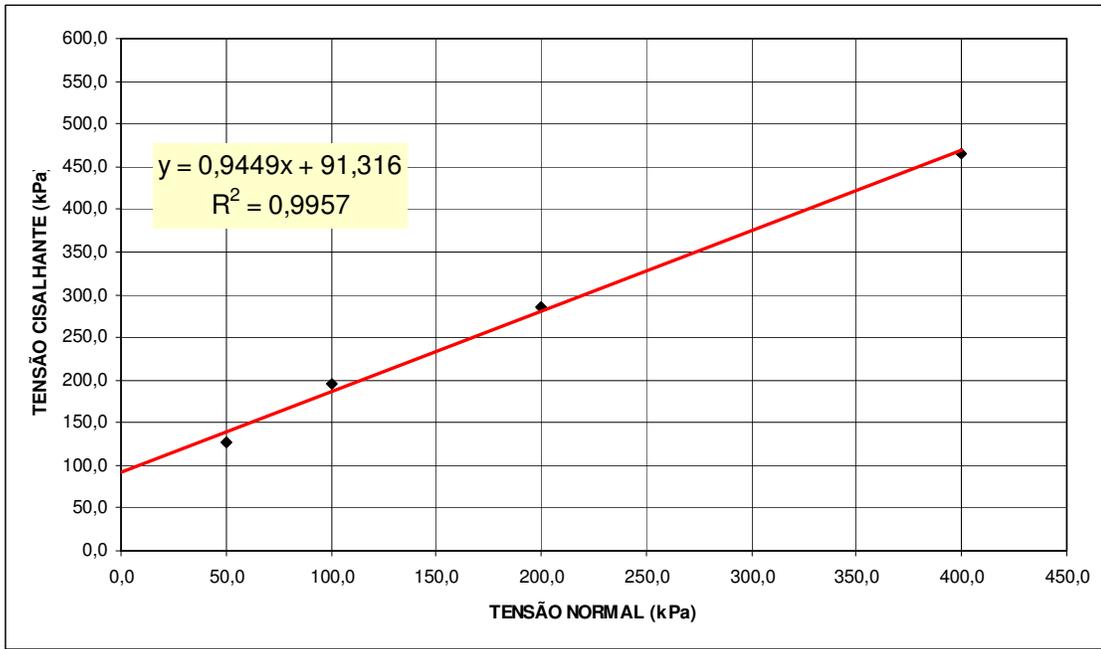


Figura. A2. 12- Envoltória de Resistência (após ensaio de alterabilidade)