

LUÍS OTÁVIO RIGUEIRA SANTIAGO

**ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ROCHAS BÁSICAS INTRUSIVAS
METAMORFIZADAS E FILITOS SERICÍTICOS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO E SUA IMPLICAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Viçosa
Minas Gerais – Brasil
2008

LUÍS OTÁVIO RIGUEIRA SANTIAGO

**ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ROCHAS BÁSICAS INTRUSIVAS
METAMORFIZADAS E FILITOS SERICÍTICOS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO
FERRÍFERO E SUA IMPLICAÇÃO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Aprovada: 20 de agosto de 2008.

Prof. Enivaldo Minette
(Co-Orientador)

Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes
(Co-Orientador)

Prof. Roberto Francisco de Azevedo

Prof. Emílio Velloso Barroso

Prof. Eduardo Antonio Gomes Marques
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me dado capacidade e força no desenvolvimento desse trabalho;

À minha família, em especial à minha mãe, por estar sempre ao meu lado;

À minha esposa, Maíra, pelo constante apoio, motivação e carinho;

Ao meu Orientador Prof. Eduardo Antonio Gomes Marques, pelo apoio, orientação, dedicação profissional, por depositar sua confiança em minha pessoa para a realização deste trabalho e principalmente pela amizade;

Ao Prof. Enivaldo Minette, pela amizade e indispensável colaboração ao longo deste trabalho;

À conselheira Profa. Izabel Azevedo, pelo apoio, incentivo e sugestões ao longo deste trabalho;

Ao Prof. Roberto Azevedo, pela amizade, apoio e sugestões na execução deste trabalho;

Ao conselheiro Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes, do Departamento de Solos da UFV, pela fundamental e indispensável apoio nas análises e interpretações dos resultados de mineralogia dos materiais estudados;

Ao Prof. Emílio Velloso Barroso, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, pelas importantes sugestões colocadas na qualificação;

Aos colegas de curso, Edgar, Fabiano, Walcyr, Rogério, Rodrigo, Gersonito, Néia, Tiago, Danilo, Gisele, Simone, Rodrigo Zorzal, Flávio, Fernando, Taciano e tantos outros que, de alguma maneira, contribuíram para a realização da tese e pela agradável convivência;

Aos estagiários Adonai, Messias e Betânia e em especial ao estagiário Weliton pela ajuda nos ensaios de laboratório;

Aos amigos Marcelo Corrêa da Silva e Leandro Neves Duarte (Alemão, meu irmão), pelo companheirismo, sugestões e contribuição fundamental neste trabalho;

Ao Departamento de Geotecnia da UFV, seus professores e funcionários, pelo uso dos laboratórios e por tudo que aprendi como estudante de graduação e doutorado;

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, em especial aos técnicos Júlio Carlos dos Santos (Julinho), Paulo

Afonso da Silva (Paulo P3), Paulo Capelão, pela atenção, amizade e ajuda nos ensaios de laboratório;

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil que proporcionaram toda a estrutura para a realização deste trabalho;

Ao Núcleo de Microscopia Eletrônica/UFV (NME);

À Cláudia Alencar Vanetti, técnica do Núcleo de Microscopia Eletrônica/UFV;

Ao laboratório de mineralogia DS/UFV;

Ao Francisco (Chico) técnico do laboratório de mineralogia DS/UFV;

Ao laboratório de análise química do DS/UFV;

Ao Carlinhos funcionário do laboratório de análise química DS/UFV;

À Marmoraria Bela, pelo apoio extra classe, no preparo dos corpos de prova;

À CAPES pela apoio financeiro para realização deste trabalho;

À Companhia Vale do Rio Doce - VALE, nas pessoas dos senhores Teófilo Costa e Paulo Ricardo de Franca, pelo fornecimento de material para análise e financiamento de parte deste trabalho.

BIOGRAFIA

Luís Otávio Rigueira Santiago, filho de Rosinval Pereira Santiago e Maria Helena Rigueira Santiago, nascido em 25 de setembro de 1978, na cidade de Viçosa, MG.

Em 1998, iniciou o curso de graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

Em dezembro de 2002, concluiu o curso Graduação em Engenharia Civil na mesma Instituição.

Em março de 2003, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Civil, na área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

Em agosto de 2004, iniciou o curso de Doutorado em Engenharia Civil, na área de concentração em Geotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, através de transferência direta do mestrado para o doutorado.

Em agosto de 2008, concluiu o curso Doutorado em Engenharia Civil na mesma Instituição.

SUMÁRIO

Página

SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE GRÁFICOS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Apresentação do Trabalho.....	3
1.3. Objetivos.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Estudos Anteriores.....	5
2.2. Rochas Ígneas.....	8
2.3. Rochas Metamórficas.....	10
2.4. Anisotropia.....	11
2.5. Alteração Intempérica ou Intemperismo.....	12
2.5.1. Intemperismo Físico.....	12
2.5.2. Intemperismo Químico.....	13
2.6. Alteração.....	14
2.6.1. Comportamento Geotécnico em Face da Alteração.....	16
2.6.2. Perfis de Intemperismo.....	16
3. ÁREA EM ESTUDO	18
3.1. Caracterização.....	18
3.2. Geologia.....	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS – ROCHAS	28
4.1. Materiais.....	28
4.2. Metodologia de Campo.....	30
4.3. Metodologia de Laboratório.....	30
4.3.1. Ensaio de Caracterização Física.....	30
4.3.2. Análise Petrográfica.....	32
4.3.3. Difractometria de Raios-X.....	32
4.3.4. Microscopia Eletrônica de Varredura.....	34
4.3.5. Ensaio de Ciclagem Natural.....	37
4.3.6. Ensaio de Ciclagem Artificial Água e Estufa.....	38
4.3.7. Ensaio de Ciclagem Acelerada em Etileno-Glicol.....	39
4.3.8. Ensaio de Resistência à Compressão Puntiforme – Point Load Test.....	40
4.3.9. Método RI – Relação de Interdependência.....	42

5.	MATERIAIS E MÉTODOS – ROCHAS ALTERADAS/SOLOS	44
5.1.	Materiais.....	44
5.2.	Metodologia de Campo	47
5.3.	Metodologia de Laboratório.....	47
5.3.1.	Ensaio de Caracterização Física.....	48
5.3.2.	Ensaio de Difractometria de Raios-X	50
5.3.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura	50
5.3.4.	Ensaio de Adensamento Unidimensional.....	51
5.3.5.	Ensaio Triaxial	52
6.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS – ROCHAS.....	53
6.1.	Caracterização Física.....	53
6.1.1.	Filito Sericítico	54
6.1.2.	Rocha Básica Intrusiva.....	58
6.2.	Análise Petrográfica	61
6.3.	Difractometria de Raios-X.....	63
6.4.	Microscopia Eletrônica de Varredura	64
6.5.	Ciclagem Artificial em Água-Estufa	70
6.5.1.	Filito Sericítico	70
6.5.2.	Rocha Básica Intrusiva.....	73
6.6.	Ciclagem Acelerada em Etilenoglicol	75
6.6.1.	Filito Sericítico	76
6.6.2.	Rocha Básica Intrusiva.....	77
6.7.	Ciclagem Natural.....	79
6.8.	Básica Intrusiva	80
6.9.	Point Load Test	82
6.9.1.	Filito Sericítico	83
6.9.2.	Rocha Básica Intrusiva.....	84
6.10.	RI – Relação de Interdependência	86
7.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS – ROCHAS ALTERADAS/SOLOS..	87
7.1.	Caracterização Física.....	87
7.1.	Granulometria Conjunta	88
7.2.	Difractometria De Raios-X	89
7.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura	99
7.4.	Classificação Geotécnica Dos Solos Estudados.....	103
7.5.	Ensaio De Adensamento Unidimensional (Oedométrico)	104
7.6.	Ensaio Triaxial - CIU _{SAT}	106
8.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	108
8.1.	Filito Sericítico	109
8.1.1.	Relação entre a Porosidade Aparente e Absorção D'água Aparente com a Perda de Massa no Ensaio de Ciclagem Artificial Água-Estufa	109
8.1.2.	Correlação entre as Massas Específicas Aparentes e a Resistência à Compressão Puntiforme.....	109
8.1.3.	Correlação entre a Porosidade Aparente e Absorção D'água Aparente com a Resistência à Compressão Puntiforme	111

8.2.	Rocha Básica Intrusiva.....	113
8.2.1.	Correlação entre a Perda de Massa no ensaio de ciclagem artificial Água-Estufa e a Perda de Massa no Ensaio de Ciclagem Natural	113
8.2.2.	Relação entre a Porosidade Aparente e Absorção D'água Aparente com a Perda de Massa no Ensaio de Ciclagem Artificial Água-Estufa	113
8.2.3.	Correlação entre as Massas Específicas Aparentes e a Resistência à Compressão Puntiforme.....	114
8.2.4.	Correlação entre a Porosidade Aparente e a Absorção D'água Aparente e a Resistência à Compressão Puntiforme	116
9.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	123
9.1.	Aspectos Gerais	123
9.2.	Conclusões.....	123
9.3.	Sugestões para Trabalhos Futuros	125
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
ANEXOS	A.1.....	134
ANEXOS	A.2.....	139
ANEXOS	A.3.....	144
ANEXOS	A.4.....	154
ANEXOS	A.5.....	160

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 2.1: Composições médias de magmas graníticos, andesíticos e basálticos, Fonte: TEIXEIRA et al. (2003).	9
Figura 2.2: Relações entre Índice de cor, teor de sílica, composição mineralógica e ambiente de cristalização para rochas ígneas mais comuns (excluindo as alcalinas). Fonte: TEIXEIRA et al. (2003).	10
Figura 2.3: Metamorfismo em diagrama P x T. Fonte: TEIXEIRA et al. (2003).	11
Figura 2.4: Amostras após ciclagem em água-estufa.	15
Figura 4.1 – Talude da Mina do Pico onde foram coletadas amostras de filito sericítico.	29
Figura 4.2 – Amostras ilustrando o filito sericítico, obtido a partir de furos de sondagem rotativa, na mina do Tamandú.	29
Figura 4.3 – Talude da Mina do Pico onde foram coletadas amostras de rocha básica intrusiva.	29
Figura 4.4 – Amostras ilustrando a rocha básica intrusiva, obtidas a partir de furos de sondagem rotativa, na mina do Tamandú.	29
Figura 4.5 – Amostras de Rocha básica intrusiva.	30
Figura 4.6 – Ilustração da Balança Hidrostática	31
Figura 4.7 – Lâminas para o ensaio de Difratometria de Raio X	33
Figura 4.8: Detalhe de uma lâmina após a metalização.	35
Figura 4.9: Metalizador utilizado - marca Balzers modelo SCD 010 Sputter Coater	35
Figura 4.10: Imagem do microscópio eletrônico de varredura utilizado - marca LEO modelo ZP 1430.	36
Figura 4.11: Imagem Microscópica da amostra de filito sericítico.	36
Figura 4.12: Forma de exposição das amostras na ciclagem natural.	37
Figura 4.13: Preparação das amostras para ensaio de ciclagem.	39
Figura 4.14: Amostras utilizadas no ensaio de ciclagem.	39
Figura 4.15 – Equipamento de compressão puntiforme.	40
Figura 4.16 – Ilustração das dimensões de um corpo de prova.	41
Figura 5.1 – CMT 01A – FS	45
Figura 5.2 – CMT 01B – FS	45
Figura 5.3 – CMT 01C – FS	45
Figura 5.4 – TAM 02A – BI	45
Figura 5.5 – TAM 02B – BI	46
Figura 5.6: PIC 06A – BI	46
Figura 5.7: CMT 04A – BI	46

Figura 5.8: CMT 04B – BI	46
Figura 5.9: Preparação para o ensaio de Análise Granulométrica de Solos, realizado conforme NBR 7181/84.....	48
Figura 5.10: Preparação para o ensaio de determinação da Massa Específica dos Grãos dos Solos, realizado conforme NBR 6508/84.	48
Figura 5.11: Preparação para o ensaio de determinação dos Limites de Atterberg realizados conforme NBR 6459/84 para o Limite de Liquidez e NBR 7180/84 para o Limite de Plasticidade.	48
Figura 5.12: Imagem Microscópica da amostra CMT 01A – FS	51
Figura 6.1: Lâmina FS 13/85.....	62
Figura 6.2: Lâmina RBI 15/85	62
Figura 6.3: Diagrama de Raios-X referente à amostra do filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	63
Figura 6.4: Diagrama de Raios-X referente à amostra da rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	64
Figura 6.5: Imagem mostrando o filito anterior à ciclagem água-estufa. Observa-se a textura fina da rocha, com muitos minerais de hábito planar (micas).....	64
Figura 6.6: Imagem da amostra de filito após 25 ciclos em água-estufa. Nota-se uma maior fragmentação da rocha, com diversos minerais de hábito planar (micas).....	65
Figura 6.7: Imagem da amostra de filito após 50 ciclos de ciclagem. A fragmentação da rocha aumenta ainda mais. Não é possível observar a formação de novos minerais.....	65
Figura 6.8: Filito após 75 ciclos. A amostra apresenta-se bastante semelhante à amostra com 50 ciclos.	66
Figura 6.9: Amostra de filito após 100 ciclos no ensaio de ciclagem água-estufa. É possível observar a presença de inúmeros minerais com hábito planar (micas), descoladas da matriz rochosa. Alguns aglomerados de mica mostram esfoliação..	66
Figura 6.10: Detalhe da amostra de rocha básica sã.	67
Figura 6.11: Imagem da básica intrusiva após 25 ciclos no ensaio de ciclagem água-estufa. A rocha apresenta um aspecto um pouco mais fraturado, com alguns minerais mostrando sinais de alteração intempérica na porção direita da imagem..	67
Figura 6.12: Detalhe da amostra de básica intrusiva após 50 ciclos. A amostra ainda apresenta-se visualmente muito semelhante à amostra com 25 ciclos.	68
Figura 6.13: Imagem de básica intrusiva após 75 ciclos. Nota-se um intenso fraturamento dos minerais.	68
Figura 6.14: Aspecto da básica intrusiva após 100 ciclos.	69
Figura 6.15: Imagem com menor detalhe da amostra de básica intrusiva após 100 ciclos. Observa-se que o aspecto da rocha encontra-se bastante modificado em relação a rocha sã. Os minerais mostram sinais de alteração intempérica e encontram-se bastante fragmentados.	69
Figuras 6.16: Rocha Básica ao final do ensaio de ciclagem acelerada em etilenoglicol.	76
Figura 6.17: Ilustração da precipitação mensal de 2004, Fonte: do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.	79

Figura 6.18: Organograma obtido nos ensaios realizados.	80
Figura 7.1: Diagrama de Raios-X da fração argila CMT 01A. Radiação $K\alpha$ Co.	90
Figura 7.2: Diagrama de Raios-X da amostra total CMT 01A. Radiação $K\alpha$ Co.	90
Figura 7.3: Diagrama de Raios-X da fração silte CMT 01B. Radiação $K\alpha$ Co.	91
Figura 7.4: Diagrama de Raios-X da amostra total CMT 01B. Radiação $K\alpha$ Co.	91
Figura 7.5: Diagrama de Raios-X da fração argila CMT 01C. Radiação $K\alpha$ Co.	92
Figura 7.6: Diagrama de Raios-X da amostra total CMT 01C. Radiação $K\alpha$ Co.	92
Figura 7.7: Diagrama de Raios-X da fração argila CMT 04A. Radiação $K\alpha$ Co.	93
Figura 7.8: Diagrama de Raios-X da amostra total CMT 04A. Radiação $K\alpha$ Co.	93
Figura 7.9: Diagrama de Raios-X da fração argila CMT 04B. Radiação $K\alpha$ Co.	94
Figura 7.10: Diagrama de Raios-X da amostra total CMT 04B. Radiação $K\alpha$ Co.	94
Figura 7.11: Diagrama de Raios-X da fração argila TAM 02A. Radiação $K\alpha$ Co.	95
Figura 7.12: Diagrama de Raios-X da amostra total TAM 02A. Radiação $K\alpha$ Co.	95
Figura 7.13: Diagrama de Raios-X da fração argila TAM 02B. Radiação $K\alpha$ Co.	96
Figura 7.14: Diagrama de Raios-X da amostra total TAM 02B. Radiação $K\alpha$ Co.	96
Figura 7.15: Diagrama de Raios-X da fração argila PIC 06A. Radiação $K\alpha$ Co.	97
Figura 7.16: Diagrama de Raios-X da amostra total PIC 06A. Radiação $K\alpha$ Co.	97
Figura 7.17: Imagem do solo residual de filito a amostra CMT1A. Observa-se o predomínio de material micáceo com esfoliação.	99
Figura 7.18: Imagem da amostra CMT1B. Observa-se grande presença de micas. Alguns aglomerados apresentam sinais de esfoliação.	99
Figura 7.19: Imagem do solo residual de filito da amostra CMT1C. Pode-se observar a presença predominante de material micáceo, com sinais de esfoliação.	100
Figura 7.20: Imagem da amostra de solo residual de básica intrusiva CMT4A. Observa-se um aglomerado de partículas minerais, com algumas micas.	100
Figura 7.21: Imagem do solo residual de básica intrusiva da amostra CMT4B, mostrando predomínio de minerais da fração argila, principalmente micas.	101
Figura 7.22: Imagem de solo residual de básica intrusiva da amostra TAM2A, mostrando predomínio de minerais planares (micas).	101
Figura 7.23: Imagem da amostra TAM2B (solo residual de básica intrusiva). Grande quantidade de material na fração silte, incluindo cristais de quartzo e micas.	102
Figura 7.24: Imagem da amostra de solo residual da Mina do Pico (PIC6A). A textura do solo mostra predomínio de minerais, principalmente micas, da fração argila.	102
Figura A.1.1: Curva granulométrica da amostra CMT 01A (FS)	135
Figura A.1.2: Curva granulométrica da amostra CMT 01B (FS)	135
Figura A.1.3: Curva granulométrica da amostra CMT 01C (FS)	136
Figura A.1.4: Curva granulométrica da amostra CMT 04A (BI)	136
Figura A.1.5: Curva granulométrica da amostra CMT 04B (BI)	137
Figura A.1.6: Curva granulométrica da amostra TAM 04A (BI)	137

Figura A.1.7: Curva granulométrica da amostra TAM 04B (BI)	138
Figura A.1.8: Curva granulométrica da amostra PIC 0A (BI)	138
Figura A.2.1: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra CMT 01A (FS)	140
Figura A.2.2: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra CMT 01B (FS)	140
Figura A.2.3: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra CMT 01C (FS)	141
Figura A.2.4: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra CMT 04A (BI).....	141
Figura A.2.5: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra CMT 04B (BI).....	142
Figura A.2.6: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra TAM 02A (BI).....	142
Figura A.2.7: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra TAM 02B (BI).....	143
Figura A.2.8: Curva e $x \log \sigma'v$ para amostra PIC 06A (BI)	143
Figura A.3.1: Trajetória de Tensões Totais para amostra CMT 01A	145
Figura A.3.2: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra CMT 01A	145
Figura A.3.3: Trajetória de Tensões Totais para amostra CMT 01B	146
Figura A.3.4: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra CMT 01B	146
Figura A.3.5: Trajetória de Tensões Totais para amostra CMT 01C	147
Figura A.3.6: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra CMT 01C	147
Figura A.3.7: Trajetória de Tensões Totais para amostra CMT 04A	148
Figura A.3.8: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra CMT 04A	148
Figura A.3.9: Trajetória de Tensões Totais para amostra CMT 04B	149
Figura A.3.10: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra CMT 04B	149
Figura A.3.11: Trajetória de Tensões Totais para amostra TAM 02A.....	150
Figura A.3.12: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra TAM 02A.....	150
Figura A.3.13: Trajetória de Tensões Totais para amostra TAM 02B.....	151
Figura A.3.14: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra TAM 02B.....	151
Figura A.3.15: Trajetória de Tensões Totais para amostra PIC 06A	152
Figura A.3.16: Trajetória de Tensões Efetivas para amostra PIC 06A	152
Figura A.4.1: Diagrama de Raios-X referente à amostra de filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	155
Figura A.4.2: Diagrama de Raios-X referente à amostra de filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	155
Figura A.4.3: Diagrama de Raios-X referente à amostra de filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	156
Figura A.4.4: Diagrama de Raios-X referente à amostra de filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	156
Figura A.4.5: Diagrama de Raios-X referente à amostra de filito sericítico. Radiação $K\alpha$ Co.....	157
Figura A.4.6: Diagrama de Raios-X referente à amostra de rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	157

Figura A.4.7: Diagrama de Raios-X referente à amostra de rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	158
Figura A.4.8: Diagrama de Raios-X referente à amostra de rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	158
Figura A.4.9: Diagrama de Raios-X referente à amostra de rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	159
Figura A.4.10: Diagrama de Raios-X referente à amostra de rocha básica intrusiva. Radiação $K\alpha$ Co.....	159

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 2.1 - Esquema de classificação e descrição de maciços rochosos intemperizados, segundo a ISRM (1981b).....	17
Tabela 4.1: Formulações utilizadas na determinação dos parâmetros físicos.....	31
Tabela 4.2: Exemplo de aplicação do método RI.	43
Tabela 5.1: Dados relativos às coletas dos blocos	47
Tabela 5.2: Intervalos para separação das frações do solo	49
Tabela 6.1: Ensaio de caracterização física para o filito sericítico (Sond. Rotativa). 54	
Tabela 6.2: Ensaio de caracterização física para o filito sericítico (Talude).....	54
Tabela 6.3: Parâmetros aferidos nos ensaios de caracterização física para o filito sericítico.	55
Tabela 6.4: Ensaio de caracterização física para rocha básica intrusiva.....	58
Tabela 6.5: Ensaio de caracterização física para a rocha básica intrusiva (Talude).	58
Tabela 6.6: Parâmetros aferidos nos ensaios de caracterização física para rocha básica intrusiva.	59
Tabela 6.7: Simbologia de identificação dos minerais.....	63
Tabela 6.8: Exames qualitativos e quantitativos realizados nos ensaios de ciclagem artificial em água-estufa para o filito sericítico.	72
Tabela 6.9: Exames qualitativos e quantitativos realizados nos ensaios de ciclagem artificial em água-estufa para a rocha básica intrusiva.	74
Tabela 6.10: Exames qualitativos e quantitativos realizados nos ensaios de ciclagem acelerada em etilenoglicol para o filito sericítico.....	76
Tabela 6.11: Exames qualitativos e quantitativos realizados nos ensaios de ciclagem acelerada em etilenoglicol para a rocha básica intrusiva.....	78
Tabela 6.12: Exames qualitativos e quantitativos realizados nos ensaios de ciclagem natural para a rocha básica intrusiva	81
Tabela 6.13: Resistência aferida nos ensaios de “ <i>Point Load</i> ” ao longo dos ciclos em água-estufa para o filito sericítico.	83
Tabela 6.14: Variação do Índice de Anisotropia em relação à ciclagem em água-estufa para o filito sericítico.....	84
Tabela 6.15: Resistência aferida nos ensaios de “ <i>Point Load</i> ” ao longo dos ciclos em água-estufa para a rocha básica intrusiva.	84
Tabela 6.16: Variação do Índice de Anisotropia em relação à ciclagem em água-estufa para a rocha básica intrusiva.	85
Tabela 6.17: Obtenção dos Índices de Interdependência entre amostras.....	86
Tabela 7.1: Resultados dos ensaios de caracterização física das amostras analisadas.....	88

Tabela 7.2: Composição granulométrica dos os solos analisados.	89
Tabela 7.3: Simbologia de identificação dos minerais.	89
Tabela 7.4: Classificação geotécnica dos solos analisados.	103
Tabela 7.5: Cálculo do Índice de Atividade.	104
Tabela 7.6: Resultados dos ensaios de adensamento unidimensional (Oedométrico).	105
Tabela 7.7: Valores dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais.	106
Tabela 8.1: Variação das características físicas e mecânicas das rochas estudadas.	118

LISTA DE GRÁFICOS

Página

Gráfico 6.1: Variação da Massa Específica Aparente Seca para o filito sericítico, ao longo do ensaio de ciclagem água-estufa.....	56
Gráfico 6.2: Variação da Massa Específica Aparente Saturada para o filito sericítico, ao longo do ensaio de ciclagem.....	56
Gráfico 6.3: Variação da Porosidade Aparente para o filito sericítico, ao longo do ensaio de ciclagem.	57
Gráfico 6.4: Variação da Absorção D'água Aparente para o filito sericítico, ao longo do ensaio de ciclagem.	57
Gráfico 6.5: Variação da Massa Específica Aparente Seca para a rocha básica intrusiva, ao longo do ensaio de ciclagem.	59
Gráfico 6.6: Variação da Massa Específica Aparente Saturada para a rocha básica intrusiva, ao longo do ensaio de ciclagem.	60
Gráfico 6.7: Variação da Porosidade Aparente para a rocha básica intrusiva, ao longo do ensaio de ciclagem.....	60
Gráfico 6.8: Variação da Absorção D'água Aparente para a rocha básica intrusiva, ao longo do ensaio de ciclagem.....	61
Gráfico 6.9: Composição dos ataques sofridos pelo filito sericítico ao longo do ensaio de ciclagem.	71
Gráfico 6.10: Composição da perda de massa sofrida pelo filito sericítico ao longo do ensaio de ciclagem.	73
Gráfico 6.11: Composição dos ataques sofridos pela rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem.	74
Gráfico 6.12: Composição da perda de massa sofrida pela rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem.....	75
Gráfico 6.13: Composição dos ataques sofridos pelo filito sericítico ao longo do ensaio de ciclagem.	77
Gráfico 6.14: Composição da perda de massa sofrida pelo filito sericítico ao longo do ensaio de ciclagem.	77
Gráfico 6.15: Composição da perda de massa sofrida pela rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem.....	78
Gráfico 6.16: Composição dos ataques sofridos pela rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem.	81
Gráfico 6.17: Composição da perda de massa sofrida pela Rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem.....	82
Gráfico 6.18: Variação da perda de resistência sofrida pelo filito sericítico ao longo do ensaio de ciclagem água-estufa.	83
Gráfico 6.19: Variação da perda de resistência sofrida pela rocha básica intrusiva ao longo do ensaio de ciclagem água-estufa.....	85
Gráfico 7.1: Resultados da granulometria conjunta dos solos estudados.	88

Gráfico 7.2: Tensão de pré-adensamento dos solos.	105
Gráfico 7.3: Coesão efetiva dos Solos.	107
Gráfico 7.4: Ângulo de atrito dos solos.	107
Gráfico 8.1: Porosidade Aparente / Absorção Aparente x Perda de Massa Ciclagem Artificial Água-Estufa.	109
Gráfico 8.2: Massa Específica Aparente Seca x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	110
Gráfico 8.3: Massa Específica Aparente Seca x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	110
Gráfico 8.4: Massa Específica Aparente Saturada x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	110
Gráfico 8.5: Massa Específica Aparente Saturada x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	111
Gráfico 8.6: Porosidade Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	111
Gráfico 8.7: Porosidade Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	112
Gráfico 8.8: Absorção Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme perpendicular à Foliação.	112
Gráfico 8.9: Absorção Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	112
Gráfico 8.10: Massa Específica Aparente Seca x Perda de Massa Ciclagem Artificial Água-Estufa.	113
Gráfico 8.11: Porosidade Aparente / Absorção Aparente x Perda de Massa Ciclagem Artificial Água-Estufa.	114
Gráfico 8.12: Massa Específica Aparente Seca x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	114
Gráfico 8.13: Massa Específica Aparente Seca x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	115
Gráfico 8.14: Massa Específica Aparente Saturada x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	115
Gráfico 8.15: Massa Específica Aparente Saturada x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	115
Gráfico 8.16: Porosidade Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	116
Gráfico 8.17: Porosidade Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	116
Gráfico 8.18: Absorção Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Perpendicular à Foliação.	117
Gráfico 8.19: Absorção Aparente x Perda de Resistência à Compressão Puntiforme Paralela à Foliação.	117

LISTA DE SÍMBOLOS

P – Pressão

P_{H_2O} – Pressão de água

T – Temperatura em °C

ρ_{aSEC} – massa específica aparente seca

ρ_{aSAT} – massa específica aparente saturada

η_a – porosidade aparente

α_a – absorção d'água aparente

λ_1 – índice de alterabilidade

λ_2 – índice de interdependência

$\lambda_{MÁX}$ – índice de alterabilidade máximo

IS, IS50 – índices de resistência

FC – fator de correção

De – diâmetro equivalente

D' – dimensão medida no instante da ruptura (Point Load)

P – carga de ruptura (Point Load)

LL – limite de liquidez

LP – limite de plasticidade

IP – índice de plasticidade

IA – índice de atividade

σ'_v – tensão de pré-adensamento

σ_1 – tensão de cisalhamento

σ_3 – tensão de confinamento

$\Delta\sigma_3$ – variação da tensão de confinamento

B – parâmetro de poro-pressão de Skempton

Qz – mineral quartzo

Mi – mineral mica

Fd – mineral feldspato

Gb – mineral gibbsita

Gt – mineral goethita

Ct – mineral caulinita

OI – mineral olivina

Px – mineral piroxênio

Ha – mineral halita

He – mineral hematita

γ - peso específico natural

γ_s – peso específico dos sólidos

γ_d – peso específico seco

w – teor de umidade

e – índice de vazios

e_0 – índice de vazios inicial

Sr – grau de saturação

Cc – índice de compressão

c, c' - intercepto da coesão total, intercepto da coesão efetiva

ϕ , ϕ' – ângulo de atrito total, ângulo de atrito efetivo

R^2 , r – coeficientes de correlação

p-value – valor de probabilidade

RESUMO

SANTIAGO, Luís Otávio Rigueira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2008. **Alteração e Alterabilidade de Rochas Básicas Intrusivas Metamorfizadas e Filitos Sericíticos da Região do Quadrilátero Ferrífero e sua Implicação no Comportamento Mecânico.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-Orientadores: Enivaldo Minette, Izabel C. D. Duarte de Azevedo e Maurício Paulo Ferreira Fontes.

Este trabalho apresenta os estudos realizados para caracterização física, mecânica e mineralógica de dois litotipos problemáticos (filito sericítico, pertencente à Formação Batatal e rocha básica intrusiva) presentes na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. O principal objetivo foi caracterizar a alterabilidade apresentada por estes materiais quando submetidos aos agentes intempéricos e que podem causar imprevistos em obras de engenharia, principalmente em taludes de corte, uma vez que as propriedades geomecânicas destes materiais variam de forma significativa com o avanço da alteração em um curto período de tempo, resultando em materiais de baixa resistência. Este estudo contou com a amostragem de rochas de baixo grau de alteração (Classe II) na mina do Pico do Itabirito e na mina do Tamanduá, em furos de sondagem rotativa e na face de taludes; e amostragem de oito blocos indeformados destas rochas, agora apresentando elevado grau de alteração, nas minas do Pico do Itabirito, Tamanduá e Capitão do Mato. Em todas as amostras foram realizados ensaios de caracterização física, mecânica e mineralógica. Inicialmente foram realizados, para as amostras com menor grau de alteração, ensaios de ciclagem artificial, acelerada em etileno-glicol e natural, objetivando caracterizar sua alterabilidade, bem como os principais ataques sofridos e sua reação frente ao intemperismo. Concomitantemente às ciclagens, foram realizados ensaios de caracterização física, mineralógica e mecânica, de forma a obter parâmetros nos diferentes estágios de alteração, para posterior análise e correlação destas informações. Para as amostras mais alteradas, iniciou-se com ensaios de caracterização física envolvendo limites de Atterberg, granulometria conjunta e massa específica dos sólidos, caracterização mecânica com ensaios de adensamento oedométrico e ensaio de cisalhamento triaxial, e caracterização mineralógica, através de análises petrográfica, microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raios-X. Adicionalmente foi proposta uma metodologia, que tem por objetivo fornecer subsídios para criação de uma escala de alterabilidade.

ABSTRACT

SANTIAGO, Luís Otávio Rigueira, D.Sc., Federal University of Viçosa, August of 2008.

Weathering and weatherability of metamorphised intrusive igneous rocks and sericitic phylites of the Iron Quadrangle and its implication on their mechanical behaviour. Advisor: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-Advisors: Enivaldo Minette, Izabel C. D. Duarte de Azevedo and Maurício Paulo Ferreira Fontes.

The present work presents the results of physical, mechanical and mineralogical study of two rock types commonly found at Quadrilátero Ferrífero region (Minas Gerais State, Brazil). The main purpose of the study was to characterize the weatherability of those rocks when exposed to weathering agents that may cause problems in some civil engineering works, mainly mining cut slopes as its mechanical properties vary significantly with the development of weathering in a short period of time, resulting in low strength materials. The study was carried on Class II rock samples of Pico do Itabirito and Tamanduá mines, collected in both rock drilling wells and rock slope faces, and in undisturbed weathered block samples from Pico do Itabirito, Tamanduá and Capitão do Mato mines. All samples were submitted to physical, mineralogical and mechanical tests. Class II rock samples were initially submitted to accelerated (natural, with ethylene glycol and water-oven) cycling tests in order to characterize both weatherability and mineralogical, mechanical and physical changes due to weathering. For more weathered samples with soil-like behavior characterization was based on tests such as Atterberg limits, grain size distribution, solid specific mass, consolidation tests, triaxial strength tests and mineralogical characterization through X-ray diffraction, petrography analysis and SEM images. Additionally, a method to propose a weathering scale was developed.

1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1. INTRODUÇÃO

Diversos autores em diferentes locais do mundo têm estudado a influência da alteração intempérica ou intemperismo e da alterabilidade sobre as propriedades geomecânicas de rochas. RUXTON & BERRY (1957), DEERE & PATTON (1971), DEARMAN (1976), SOMERS (1988), LEE & DE FREITAS (1989), DOBEREINER & PORTO (1990), entre outros, que, estudando perfis de alteração de rochas de diversas gêneses, procuraram caracterizar a variação das propriedades mecânicas ao longo de perfis de alteração, desde a rocha sã até a rocha extremamente alterada. Também no Brasil, o interesse pela caracterização dos produtos resultantes da alteração intempérica e sua influência sobre suas propriedades mecânicas resultou em uma série de trabalhos, com destaque para os trabalhos de BARROSO (1993), MENEZES FILHO (1993), VAZ (1996), MARQUES (1998).

A importância do estudo da influência da alteração intempérica e da alterabilidade está intimamente relacionada ao desenvolvimento de perfis de intemperismo, caracterizados pela ocorrência de diversos materiais de transição entre rocha sã e solo residual, fenômeno bastante comum em regiões de clima tropical úmido. A ocorrência destes perfis em obras geotécnicas envolvendo taludes de corte, fundações, escavações subterrâneas e a céu aberto é de fundamental importância, posto que a ação intempérica atuando sobre as rochas produz materiais extremamente diferentes do ponto de vista, físico, mineralógico e principalmente mecânico. Some-se a isso a presença de

descontinuidades estruturais, que além de influenciarem na circulação da água em sub-superfície, e, portanto na alteração intempérica, introduzem grandes variações de comportamento mecânico nos materiais presentes e condicionam a estabilidade de taludes em função de sua geometria e propriedades de resistência. Tem-se, assim, um importante e complexo mecanismo de instabilização de maciços rochosos.

O Quadrilátero Ferrífero constitui-se em uma área especialmente interessante nesse aspecto, em função da presença de rochas metamórficas muito deformadas, com inúmeras descontinuidades estruturais e espessos perfis de alteração desenvolvidos em função das características climáticas e dos tipos litológicos existentes na região, tais como: Filitos, Xistos Finos, Básicas Intrusivas, Itabiritos, etc.

Como já apontado anteriormente, nos maciços rochosos característicos do Quadrilátero Ferrífero, vários fatores contribuem para aumentar a complexidade dos mecanismos de ruptura em taludes, entre eles:

- ✓ A complexidade estrutural dos maciços, evidenciada pela presença de diferentes descontinuidades, associada à ocorrência de dobramentos em várias escalas;
- ✓ A presença de tipos litológicos de elevada alterabilidade, representados por Filitos, Xistos finos e Rochas Básicas;
- ✓ A irregularidade do topo rochoso;
- ✓ A anisotropia do material; e
- ✓ A presença de maciços rochosos com diferentes estágios de alteração e, portanto, com propriedades geomecânicas completamente diferentes.

A Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, tem realizado uma série de estudos de caracterização tanto da alteração intempérica quanto da alterabilidade de alguns litotipos existentes no Quadrilátero Ferrífero.

Este trabalho abordará as propriedades influenciadas pela alteração, estudando não somente a parte física e mecânica, mas também a variação da composição mineralógica, com a finalidade de obter parâmetros de caráter funcional e de segurança para obras de engenharia civil, nas quais estes litotipos se encontram.

1.2. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de tese é dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo 1 – Introdução Geral: apresentam-se as justificativas que levaram à execução deste trabalho e são explicitados os objetivos da tese;

Capítulo 2 – Revisão de Literatura: apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, bem como se faz um breve resumo de alguns estudos anteriores;

Capítulo 3 – Área de Estudo: apresenta-se a localização e a caracterização geológica da área de estudo bem como aspectos relacionados às classificações geomecânicas possíveis;

Capítulo 4 – Materiais e Métodos – Rocha: são apresentadas as rochas utilizadas na presente pesquisa e a metodologia aplicada tanto em campo como em laboratório para sua extração e realização dos ensaios;

Capítulo 5 – Materiais e Métodos – Rochas Alteradas/Solos: são apresentados as rochas alteradas/solos residuais, utilizadas na presente pesquisa e a metodologia aplicada tanto em campo como em laboratório para sua extração e realização dos ensaios;

Capítulo 6 – Apresentação dos Resultados – Rochas: São apresentados os ensaios de laboratório e as interpretações dos mesmos para as rochas estudadas;

Capítulo 7 – Apresentação dos Resultados – Rochas Alteradas/Solos: São apresentados os ensaios de laboratório e as interpretações dos mesmos para as rochas alteradas/solos residuais estudados;

Capítulo 8 – Discussão dos Resultados: são apresentadas as regressões e correlações, realizadas a partir do cruzamento dos resultados dos ensaios de rochas e rochas alteradas/solos residuais;

Capítulo 9 – Conclusões e Sugestões para Novas Pesquisas: são apresentados aspectos gerais, seguido das conclusões e recomendações para trabalhos futuros;

Capítulo 10 – Referências: são apresentadas as referências bibliográficas consultadas; e

Anexos: são apresentados os gráficos obtidos nos ensaios de granulometria de solos, adensamentos, triaxiais e as difratometrias de raios-X, bem como o registro fotográfico do desenvolvimento do trabalho.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivos principais:

- Analisar as variações das propriedades físicas e mecânicas com o avanço da alteração intempérica em algumas rochas encaixantes típicas de duas minas da região do Quadrilátero Ferrífero no Estado de Minas Gerais, particularmente as rochas básicas intrusivas e os filitos sericíticos;
- Analisar a influência da mudança da mineralogia resultante da alteração intempérica sobre as propriedades físicas e mecânicas; e
- Propor um método, que tenha por objetivo fornecer subsídios para criação de uma escala de alterabilidade.
- Caracterização da alteração e da alterabilidade de dois dos litotipos mais problemáticos em termos de alteração intempérica e de alterabilidade existentes no Quadrilátero Ferrífero – básicas intrusivas metamorfizadas e filitos sericíticos;
- Caracterização física, mecânica e mineralógica das rochas alteradas/solos residuais destes litotipos, com identificação dos minerais primários e secundários, em amostras coletadas nas Minas do Tamanduá, Pico do Itabirito e Capitão do Mato.

Os materiais foram coletados nas Minas do Pico do Itabirito, do Tamanduá e Capitão do Mato, pertencentes à extinta empresa MBR – Minerações Brasileiras Reunidas S. A., incorporada pela Companhia Vale do Rio Doce.